

Hidrogel como mitigador de estrés hídrico

una revisión

Abraham Palacios Romero¹, Rodrigo Rodríguez Laguna², Francisco Prieto García¹, Joel Meza Rangel², Ramón Razo Zarate² y María de la Luz Hernández Flores¹

Instituto de Ciencias Básicas e Ingenierías¹, Instituto de Ciencias Agropecuarias²
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Pachuca, Hgo.¹; Tulancingo, Hgo.²; México
[abraham.palacios.romero@gmail.com]

Abstract— Hydrogel are polymers with the ability to store large amounts of water, due to this, there is growing interest in these materials as water stress relievers and also as catalysts in germination and growth. So this review aim to compile existing information about these studies The use of hydrogel can be traced back to the 80s, where it began to demonstrate its effectiveness not only as water stress relievers but also increasing resistance to wilting and promoting a gain in biomass. In the 2000s, studies confirmed that the hydrogel was able to mitigate water stress, improving survival, growth and biomass increase in drought conditions in a variety of plant species.

Keywords— *Climate change, drought, stress, water stress mitigation*

Resumen— El hidrogel es un polímero con capacidad de almacenar grandes cantidades de agua y existe un creciente interés en este material como mitigador de estrés hídrico y catalizador de la germinación y crecimiento. La presente revisión pretende recopilar la información existente sobre estos estudios. El uso de hidrogel se puede rastrear desde los años 80, que se comenzó a demostrar su efectividad como mitigador del estrés hídrico, al incrementar la resistencia al marchitamiento e incrementar la biomasa. En los años 2000, los estudios confirmaban al hidrogel como agente capaz de mitigar el estrés hídrico y mejorar la supervivencia, crecimiento e incremento de biomasa en condiciones de sequía en una gran variedad de especies vegetales.

Palabras clave— *Cambio climático, estrés, mitigación de estrés hídrico, sequía*

I. INTRODUCCIÓN

Estrés es la consecuencia de todo factor externo que influencia a la planta y que puede limitar el funcionamiento de la misma [1]. Debido a esto, todas las plantas, pueden llegar a presentar signos de estrés, ya sea durante pocos minutos, días, semanas o meses. El estado hídrico de las plantas depende del balance del agua que absorben del suelo y la que pierden por transpiración. Por lo que un exceso de transpiración puede provocar un déficit, que dependiendo de la intensidad y el tiempo que dure puede influir negativamente en las plantas [2].

El estrés hídrico ya ha sido estudiado y varios autores se han dado a la tarea de sintetizar toda la información para poder comprender el efecto y las respuestas que genera en las plantas. En algunos de estos casos, este tipo de síntesis de información se ha enfocado a niveles moleculares [3] y también muchos trabajos han sido enfocados a especies de importancia comercial [4]. En general se acepta que el estrés hídrico provoca la disminución en el tamaño de las hojas, raíces y afecta negativamente el crecimiento en general de las plantas. La información aportada por este tipo de estudios muestra el daño que el estrés hídrico provoca en las hojas jóvenes y en desarrollo es mucho más apreciable que en aquellas hojas maduras y completamente desarrolladas [5].

Someter plantas recién germinadas a estrés hídrico provoca su muerte en cuestión de días [6]. Desafortunadamente en el sector agrícola los efectos del cambio climático causan un gran impacto debido a que los regímenes de temperatura y precipitación se ven modificados y con ello provocan que los cultivos enfrenten condiciones ambientales adversas [7].

Por otro lado, investigadores (mediante el uso de modelos computacionales) han descrito que las frutas de árboles expuestas a este tipo de tensión, tienden a tener una mayor concentración de azúcares, sin embargo el tamaño de la fruta tiende a disminuir [8], lo que daría pauta al desarrollo de manejos agrícolas alternativos. En especies resistentes a sequías, la falta de agua disminuye el tamaño y retrasa su crecimiento, aunque también se ha demostrado que un exceso de agua puede llegar a ser mortal para estas [9].

Debido a esto, el presente estudio tiene por objetivo actualizar la información existente sobre uno de los métodos de mitigación de estrés hídrico más estudiado en las últimas décadas

II. MITIGACIÓN DE LOS EFECTOS DEL ESTRÉS HÍDRICO

Se puede apreciar que en general, los efectos del estrés hídrico son negativos para la producción agrícola y forestal. Al mismo tiempo se han desarrollado nuevas metodologías y tecnologías que permitan mitigar estos efectos, entre las que destacan:

- Riego por goteo. Aumenta la eficiencia del riego, pero para llevarlo a cabo es necesario realizar una gran inversión económica, puesto que es necesaria la compra de equipos de riego por goteo antidrenante, un sistema de control de humedad de suelo, además de que se necesita un suelo de tipo arenoso [10].
- Poda de rebaje. Al realizar la poda, disminuye la transpiración de la planta, y por tanto, se reduce la pérdida de agua de la misma [11].
- El uso de películas reflectantes disminuye la cantidad de energía que reciben las plantas, y por tanto, previene que la temperatura en la planta aumente demasiado y comience a transpirar [10].
- Riego deficitario controlado, que consiste en disminuir el riego en temporadas en las que las plantas son menos sensibles (temporada húmeda), para de esta manera tener agua almacenada para la época de sequía. Sin embargo, con respecto al uso de esta técnica, la información es escasa, por lo que aún no es posible determinar su efectividad o el momento oportuno para usarla [10].

III. HIDROGEL

De entre las tecnologías para mitigar los efectos del estrés hídrico destaca el hidrogel que son polímeros hidrófilos, blandos, elásticos y capaces de expandirse en presencia del agua, aumentando considerablemente su volumen, pero manteniendo su forma, mientras que en estado deshidratado (xerogel) son cristalinos [12].

La capacidad del hidrogel de absorber agua surge debido a que en su estructura se encuentran grupos funcionales hidrófilos, y su resistencia a la disolución es dada por las fuerzas de cohesión producidas por el entrecruzamiento de sus moléculas [12]. Es importante mencionar que estas fuerzas de cohesión se deben a distintos tipos de interacciones como pueden ser: electrostáticas, hidrófobas, interacciones dipolo-dipolo o enlaces de hidrógeno [13].

La síntesis de hidrogel, está basada esencialmente en reacciones de copolimerización, en las cuales uno de los monómeros tiene carácter hidrófilo y el otro hidrófobo. Debido a esto, las técnicas empleadas para la síntesis pueden agruparse en dos vertientes: la polimerización en bloque y la polimerización en disolución. En el caso de la primera se añade un iniciador y un agente de entrecruzamiento a los monómeros, obteniendo de esta forma un polímero cristalino; mientras que en el caso de la segunda

técnica, la síntesis se lleva a cabo en presencia de un disolvente y un agente entrecruzante para formar un gel solvatado [14].

Debido a las bondades que tiene el hidrogel, son muy usados en el área biomédica como lentes de contacto y como liberador de controlado de fármacos [15, 16]. Además de que en las últimas décadas ha sido estudiada su viabilidad como mecanismo para mitigar o eliminar los efectos del estrés hídrico en diferentes especies de plantas [17].

Por lo que se recopiló toda la información importante sobre estudios en los que se ha usado este material como mitigador de los efectos del estrés hídrico en plantas de interés forestal y agrícola principalmente.

IV. PRIMEROS ESTUDIOS DEL HIDROGEL EN EL ÁREA FORESTAL Y AGRÍCOLA

Los primeros estudios reportados con utilización de polímeros absorbentes y considerados como mitigadores del estrés hídrico y catalizadores del crecimiento y germinación de semillas se pueden rastrear a finales de los años 70, la mayoría de estos ensayos demostraron su efectividad.

Gehring y Lewis (1980), reportaron que plantas de *Tagetespatula L.* y *Zinnia elegans Jacq.* incrementaron su resistencia al marchitamiento al encontrarse en sustratos con hidrogel [18]. Tu *et al.* (1985), observaron que el hidrogel incrementaba satisfactoriamente la capacidad de retención de agua del suelo y por tanto disminuía la necesidad del riego en plantas del género *Cineraria* [19]. Davies *et al.* (1987), concluyeron que en plantas de *Rosa multiflora*, el usar hidrogel no modificaba la dinámica hidráulica del suelo, pero sí incrementó la biomasa de las plantas [20].

A pesar de la probada efectividad en el uso del hidrogel, algunos autores como Wang (1989), en condiciones similares a las del estudio de Gehring y Lewis (1980), reportó que el uso de hidrogel en plantas de *Codiaeum variegatum L.* el efecto en el crecimiento fue nulo, aunque sí incrementó la resistencia al marchitamiento [21]

Otros estudios, orientados en las características físicas de los suelos, sentaron importantes bases para comprender el funcionamiento del hidrogel en el suelo. Fonteno y Bilderback (1993) realizaron un estudio en el cual afirman que la efectividad del hidrogel se ve altamente influenciado por las restricciones físicas que el sustrato le imponga [22], es decir, entre más espacio poroso tenga el sustrato, más fácil fue para el hidrogel expandirse o liberar el agua almacenada, en cambio se infiere que entre más arcilloso sea el suelo peor fue su desempeño.

V. HIDROGEL EN ESPECIES FORESTALES

Los estudios realizados en especies forestales se enfocan en evaluar la supervivencia y crecimiento inicial en diferentes especies forestales. Hüttermann *et al.* (1999) establecieron un ensayo en condiciones de invernadero, utilizaron plantas de seis meses de edad de *Pinus halepensis* y reportaron que el usar una concentración de 0.4% de hidrogel en el sustrato incrementó el tiempo de supervivencia en condiciones de sequía en hasta 33 días, un incremento en altura de hasta 9 cm y un incremento en biomasa radicular de hasta 2.75 g más con respecto al control [23].

Los resultados reportados por Hüttermann *et al.* (1999) fueron corroborados por Al-Humaid y Mofthah (2007) en una estación experimental de la universidad Qassim en Arabia Saudita, utilizaron dos concentraciones diferentes de hidrogel en el sustrato (0.4% y 0.6%). Que a pesar de aumentar el tiempo de supervivencia en plántulas de *Conocarpus erectus L.* en hasta 40 días más con respecto a las plantas

control, pero no reportaron diferencias estadísticamente significativas entre las dos concentraciones, lo que en apariencia contradeciría lo reportado por Hüttermann *et al.* Sin embargo, esto se puede ver que las concentraciones usadas por Al-humaid y Moftah eran muy similares por lo que no fue suficiente la diferencia en el aporte para afectar al ensayo [24].

En el caso de Barón *et al.* (2007) reportaron que la aplicación de hidrogel, modifica positivamente la dinámica hidráulica del suelo (retención y liberación del agua), lo que permite que las acacias resistan y retrasen el marchitamiento además de poder crecer bajo condiciones de estrés. Un punto importante de este trabajo realizado en instalaciones de la Universidad Nacional de Colombia, es el hecho de que hablan de la necesidad de definir las pautas que permitan elegir un hidrogel de acuerdo a las condiciones en las que se va a usar, es decir, dependiendo del tipo de suelo, las condiciones climáticas y el tipo de planta que se va a utilizar, es necesario elegir el tipo de polímero a utilizar, esto con el fin de disminuir los costos y maximizar los beneficios algo que en estudios anteriores no se había planteado [25].

En el vivero Grafton de Nueva Gales del Sur (Australia), Thomas (2008) realizó un ensayo que destaca por ser uno de los pocos estudios en los que no solo se realizaron en condiciones de invernadero, sino que también en campo. Los resultados en campo indicaron que a los 150 días de realizado el trasplante, las plantas de *Eucalyptus pilularis* Smith tenían una supervivencia de hasta un 50% más con respecto al testigo, mientras que para el caso de *Corymbia citriodora* subsp. *variegata* (F. Muell.) A.R. Bean & M.W. McDonald la supervivencia se incrementaba en hasta un 75% más con respecto al testigo al aplicar 2.5 g l⁻¹ de hidrogel a las raíces [26].

En un estudio con varias especies (*Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus citriodora*, *Pinus caribaea*, *Araucaria cunninghamii*, *Melia volkensii*, *Grevillea robusta*, *Azadirachta indica*, *Maesopsis eminii*, *Terminalia superbaera*) realizado por Agaba *et al.* (2010) probaron tres tipos distintos de suelo (arenoso, franco arenoso y franco), este trabajo confirma que el aplicar hidrogel en una concentración de 0.4% aumenta significativamente la disponibilidad del agua, reduciendo la evapotranspiración y por tanto incrementa la supervivencia en las plantas de las especies utilizadas (Tablas 1 y 2) [27].

El estudio realizado por Beniwal *et al.* (2010) destaca por que evalúa el efecto de combinar la utilización de ectomicorrizas (*Paxillus involutus*) con el uso de hidrogel en plántulas de *Populus × canescens* (una planta demandante de agua), logrando resultados altamente favorables, ya que las plantas no presentaron evidencias de sufrir estrés hídrico, sino que incluso mantuvieron tendencias de crecimientos similares a las que no se les limitó el riego [28].

Otro ensayo importante fue el realizado por Shi *et al.* (2010), en el que se reporta que el hidrogel no solo es capaz de mitigar el estrés hídrico en plantas de *Populus popularis*, sino que también es capaz de mitigar el estrés salino, ya que en su estudio encontraron que al exponer a las plantas a estos tipos de estrés de manera individual, disminuía significativamente el incremento en biomasa radicular, aérea, yemas, y el total. Por lo que se esperaba que al combinar ambos tipos de estrés, disminuyera drásticamente e incluso murieran las plantas afectadas. Sin embargo, al adicionar hidrogel, la biomasa no fue estadísticamente diferente con respecto a las plantas afectadas por solo un tipo de estrés, aunque siguió siendo significativamente menor con respecto a las plantas control en hasta 5.22 g (biomasa radicular), 4.88 g (aérea), 5.16 g (yemas) y 14.82 g (total) [29]. Por lo que se puede apreciar que el hidrogel aún tiene bondades no estudiadas.

En un estudio llevado en acabo en invernaderos del Colegio de Posgraduados en México realizado por Maldonado *et al.* (2011) se vuelve a hacer hincapié en que a mayor cantidad de hidrogel mayores son los beneficios para *Pinus greggii* Engelm, ya que en su ensayo se observa que al producir plántulas de esta especie en condiciones de estrés hídrico pero con concentraciones altas de hidrogel (4 g L⁻¹) se

lograban crecimientos de altura y diámetro cercanos a aquellas con riego normal por lo que recomiendan el uso de dosis altas de hidrogel en condiciones de restricción de humedad como medio de crecimiento en la producción de esta especie [30].

Tabla I. Resultado de por Agaba et al. (2010) en el ensayo con un sustrato arenoso y franco arenoso.

Especie	Tratamiento	Suelo arenoso			Suelo franco arenoso		
		Agua disponible para la planta (kg/maceta)	Supervivencia (días)	Evapotranspiración (Kg/maceta)	Agua disponible para la planta (kg/maceta)	Supervivencia (días)	Evapotranspiración (Kg/maceta)
<i>E. grandis</i>	Control	0.552c	24	0.023b	0.872b	25	0.035a
	0.20%	1.048b	40	0.026a	0.904b	27	0.033b
	0.40%	1.593a	104	0.015c	1.025a	62	0.017c
<i>G. robusta</i>	Control	0.617c	27	0.023a	0.947b	22	0.043a
	0.20%	1.141b	74	0.015c	1.065a	51	0.021b
	0.40%	1.675a	104	0.016b	1.104a	61	0.018c
<i>M. emimii</i>	Control	0.576c	21	0.027a	0.813b	23	0.035a
	0.20%	1.197b	91	0.013c	0.885b	36	0.025b
	0.40%	1.144a	95	0.015b	0.920ab	42	0.022c
<i>M. volkensis</i>	Control	0.552c	50	0.011c	0.924c	38	0.024a
	0.20%	1.089b	90	0.012b	0.967b	50	0.019b
	0.40%	1.566a	114	0.014a	1.008a	62	0.016c
<i>P. cariea</i>	Control	0.558c	32	0.017b	0.884a	39	0.023a
	0.20%	1.160b	59	0.020a	0.895a	42	0.021b
	0.40%	1.588a	104	0.015c	0.953a	44	0.022ab
<i>T. superba</i>	Control	0.488c	21	0.023a	0.922b	21	0.044a
	0.20%	1.017b	76	0.013c	0.955b	41	0.023b
	0.40%	1.624a	102	0.016b	0.961ab	42	0.023c
<i>A. indica</i>	Control	0.497c	23	0.022a	0.812c	25	0.032a
	0.20%	1.112b	65	0.017b	0.864b	50	0.017b
	0.40%	1.548a	112	0.014c	1.069a	114	0.009c
<i>A. cunninghamii</i>	Control	0.687c	84	0.008b	0.673b	57	0.012a
	0.20%	1.091b	145	0.008c	1.041a	106	0.010b
	0.40%	1.643a	153	0.011a	1.069a	115	0.009b
<i>E. citriodora</i>	Control	0.559c	42	0.013b	0.797a	22	0.036a
	0.20%	1.085b	50	0.022a	0.844a	27	0.031a
	0.40%	1.520a	111	0.013b	0.889a	39	0.023b

Valores en la misma fila con diferente letra (a, b, c) indican diferencias estadísticas significativas

Chirino *et al* (2011) realizó un estudio en una zona de matorral ubicada en la provincia de Castellón, España. En este ensayo se confirma que el hidrogel no solo mitiga el estrés hídrico, sino que también es un mitigador del estrés post trasplante en plantas de *Quercus suber*; ya que reporta que usar una concentración de 1.5% de hidrogel, mejora la supervivencia en hasta un 33% más con respecto al control. También indican que mejora el crecimiento de los brotes e incremento en biomasa en hasta 6.9 cm y 0.4 g más con respecto al testigo. Además observó que en las plantas con esta concentración de hidrogel el $\delta^{13}C$ tiene una composición de -25.48 mientras que el control -23.96, lo que de acuerdo a la literatura indica que el control posee un mayor estrés postrasplante, ya que (entre mayor sea el valor de $\delta^{13}C$ mayor será el grado de estrés sufrido por la planta).

Tabla II. Resultado de Agaba et al. (2010) en el ensayo con un sustrato franco.

Especie	Tratamiento	Agua disponible para la planta (kg/maceta)	Supervivencia (días)	Evapotranspiración (Kg/maceta)
<i>E. grandis</i>	Control	0.872b	25	0.035a
	0.20%	0.904b	27	0.033b
	0.40%	1.025a	62	0.017c
<i>G. robusta</i>	Control	0.947b	22	0.043a
	0.20%	1.065a	51	0.021b
	0.40%	1.104a	61	0.018c
<i>M. emimii</i>	Control	0.813b	23	0.035a
	0.20%	0.885b	36	0.025b
	0.40%	0.920ab	42	0.022c
<i>M. volkensis</i>	Control	0.924c	38	0.024a
	0.20%	0.967b	50	0.019b
	0.40%	1.008a	62	0.016c
<i>P. cariea</i>	Control	0.884a	39	0.023a
	0.20%	0.895a	42	0.021b
	0.40%	0.953a	44	0.022ab
<i>T. superba</i>	Control	0.922b	21	0.044a
	0.20%	0.955b	41	0.023b
	0.40%	0.961ab	42	0.023c
<i>A. indica</i>	Control	0.812c	25	0.032a
	0.20%	0.864b	50	0.017b
	0.40%	1.069a	114	0.009c
<i>A. cunninghamii</i>	Control	0.673b	57	0.012a
	0.20%	1.041a	106	0.010b
	0.40%	1.069a	115	0.009b
<i>E. citriodora</i>	Control	0.797a	22	0.036a
	0.20%	0.844a	27	0.031a
	0.40%	0.889a	39	0.023b

Valores en la misma fila con diferente letra (a, b, c) indican diferencias significativas

Por último, en la región de Göttingen, Alemania, Oriquiriza *et al.* (2013) realizó un estudio en el que se utilizaron plantas de *Picea abies*, *Pinus sylvestris* y *Fagus sylvatica* además de tres distintos tipos de suelo (arenoso, franco y arcilloso) a los que se le aplicó una concentración de 0.4% de hidrogel. Los resultados muestran que la efectividad del hidrogel disminuye drásticamente en suelos francos y arcillosos, ya que se pudo observar que *P. abies*, *P. sylvestris* y *F. sylvatica* incrementaron su supervivencia en 66, 71 y 57 días más con respecto al control respectivamente en suelos arenosos, mientras que en suelos francos el incremento en fue de 8, 11, y 3 días y en suelos arcillosos de solo 17, 3 y 4 días más con respecto al testigo, lo cual puede ser debido a que en este tipo de suelos, la capacidad de absorción y liberación del agua contenida en el hidrogel se ve seriamente limitada por la textura del suelo [31], confirmando lo propuesto por Fonteno y Bilderback (1993).

Es posible observar que los estudios sobre el efecto mitigador de estrés hídrico del hidrogel esta principalmente asociados a la etapa de plántula y producción en invernadero, lo cual es una excelente idea, puesto que se espera que el suministro de agua se vea limitado en el futuro cercano debido a la sobreexplotación de este recurso, por lo que los productores tendrán una alternativa lo suficientemente validada para mantener la producción de los viveros con restricciones de humedad.

Se detectó que son pocos los estudios que fueron realizados en campo por lo que resultan sumamente importantes, ya que permiten dar una idea sobre posibles usos del hidrogel en condiciones no

controladas y más cercanas a la realidad de muchos productores de plantas forestales en muchas partes del mundo. Otra razón por la cual es necesario realizar más estudios en campo es para dar pauta y sentar precedentes para expandir el conocimiento sobre nuevas aplicaciones de este tipo de materiales como pueden ser en actividades de reforestación, establecimiento de plantaciones comerciales, fitorremediación, restauración de suelos, etc. También es evidente que se podrían realizar más estudios en los que se combine el uso de hidrogel con la aplicación de otras sustancias u organismos cuya combinación pudieran ser benéficas tanto para las plantas como para los productores, tal como lo demuestra el estudio de Beniwal *et al.* (2010), estudio único de entre todos los buscados y analizados para la elaboración de la presente revisión.

VI. HIDROGEL EN ESPECIES AGRÍCOLAS

Akhter *et al.* (2004) realizaron un ensayo en instalaciones del Instituto Nuclear para la agricultura y Biología en el que se utilizaron plantas de las especies *Hordeum vulgare* L., *Triticum aestivum* L. y *Cicer arietinum* L, reportando que el hidrogel en una concentración de 0.3% es capaz de mitigar los efectos del estrés hídrico, ya que retrasa el tiempo de marchitamiento en hasta cinco días más con respecto al testigo. Es importante notar que el uso de hidrogel en este estudio, contrario a lo que se esperaba, no tuvo ningún impacto en el tiempo de germinación [32].

Geesing y Schmidhalter (2004) también usaron plantas de *Triticum aestivum* y a diferencia de lo reportado por Akhter *et al.* (2004) concluyeron que el aplicar hasta 5 g L⁻¹ hidrogel no aportaba ningún beneficio a la supervivencia o el crecimiento. Es importante aclarar que en este estudio simulan condiciones de sequía extrema, por lo que es posible que el hidrogel no fuera capaz de mitigar los efectos del estrés en tal situación [33]. Esto es importante puesto que debido al cambio climático, se espera que las temporadas de sequía se vuelvan más largas y extremas lo que provocará que las plantas estarán expuestas a una mayor cantidad de estrés y se vuelve necesario desarrollar tecnologías que ayuden a las plantas a sobrevivir en tales condiciones y de esa manera no se pongan en riesgo la seguridad alimentaria de las personas [34].

En el estudio de Rojas *et al.* (2004) se reporta que el aplicar 1% de hidrogel en suelos áridos provenientes de región de Araya en Venezuela, incrementa en hasta un 100% más la germinación de plantas de *Solanum lycopersicum* con respecto al control [35] lo cual se encuentra en concordancia con lo reportado en el estudio realizado por Hüttermann *et al.* (1999) en el que se concluye que a mayor concentración de hidrogel, mayor es la cantidad de semillas germinadas.

En el estudio realizado por Nazarli *et al.*, (2007), se incrementó la producción de semillas de *Helianthus annuus* en hasta tres veces más respecto al testigo tanto en situación de riego tradicional como en condiciones de estrés hídrico al aplicar 2.25 y 3 g/kg de suelo [36], este estudio sienta las bases para desarrollar nuevas dinámicas de riego que permitan economizar en el agua, y así contribuir a las políticas de ahorro del vital líquido que se están estableciendo en todo el mundo, además de ayudar a mejorar la agricultura de zonas áridas y semiáridas.

Hernández *et al.* (2007) realizó un experimento en tres cultivares de temporal en la región del valle de Iguala, México, en el que se usó individuos de *Brachiaria ssp.*, y reportan que el hidrogel no aporta ningún beneficio en cuanto al rendimiento de semillas [37], lo que contradice a lo reportado por Rojas *et al.* (2004), Esta discrepancia puede ser atribuido a que este estudio fue realizado en campo en terrenos de temporal (es decir, que no cuentan con sistema de riego y por tanto dependen de las lluvias para su producción) y en ese año las precipitaciones fueron elevadas, por lo que las plantas no se vieron sometidas a ninguna clase de estrés hídrico, mientras que en el estudio de Rojas *et al.* las semillas fueron

sometidas a condiciones de sequía, por lo que la humedad provista por el hidrogel fue vital para su germinación.

En las instalaciones de una de las estaciones de investigación de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Teherán, Iran, Yazdani *et al.* (2007) realizaron un estudio en el que se reporta que al aplicar 225 kg ha⁻¹ de hidrogel y con riegos cada seis días en plantas de *Glycine max* L. se incrementa la producción de semilla en hasta una tonelada más con respecto a al grupo testigo, por lo que confirma la idea propuesta por Nazarli *et al.* (2007) de que usar el hidrogel permitiría disminuir la frecuencia de riego en los cultivo y mejorando el uso del agua [38].

Dorrají *et al.* (2010) concluyeron en su trabajo que al aplicar 225 kg ha⁻¹ de hidrogel en plantas de *Zea mays*, no solo se mitigaba los efectos del estrés hídrico, ya que afectaba positivamente al incremento de biomasa y optimizaba el uso del agua en el cultivo en dos tipos de suelo diferente (franco arenoso y limoso) [39]. Este estudio destaca porque corrobora lo propuesto por Shi *et al.* (2010), ya que en este ensayo también se reportó que el hidrogel ayuda a mitigar el estrés salino, por lo que sería un valioso aditamento para asegurar el éxito de los programas de riego llevado a cabo en zonas áridas y semiáridas.

En un estudios realizado con *Agrostis stolonifera* Agaba *et al.* (2011).reportaron que el aplicar 0.4% de hidrogel en un suelo arenoso incrementa hasta cuatro veces más la biomasa de las plantas respecto a plantas en suelo sin hidrogel, mejorando las propiedades hidráulicas del suelo, lo que permite que el agua sea retenida durante un mayor tiempo y por tanto este disponible para las plantas durante un mayor tiempo [40].

Islam *et al.* (2011) también utilizo plantas de *Zea mays* en su ensayo, encontrando que usar una concentración de 15 kg ha⁻¹ y solo la mitad de la dosis de fertilizante recomendada es capaz de mantener una producción similar a una con dosis completa [41], por lo que este estudio da pauta a continuar estudiando la relación entre el efecto del hidrogel y la cantidad de fertilizante en otras especies de interés agrícola beneficiando tanto a productores como consumidores, lo cual estaría en concordancia con los trabajos antes mencionados que indican que el hidrogel ayudaría a disminuir costos en la producción sin sacrificar la calidad y cantidad de la producción.

Otros autores como Moslemi *et al.* (2011) reportaron en un estudio realizado en las instalaciones de la Universidad Islámica de Azad, Teherán que el aplicar 110 Kg/ha de hidrogel es capaz de incrementar en casi dos toneladas más la producción de grano por hectárea en plantas de *Zea mays* con respecto a plantas cultivadas de la manera tradicional en condiciones de estrés hídrico y riego normal [42]. En este trabajo también se puede apreciar que el hidrogel tiene una excelente relación con poblaciones de rizobacterias (*Azospirillum lipoferum* y *Pseudomonas putida*) ya que incrementa en casi 1 tonelada la producción de grano por hectárea e incrementa en casi dos toneladas más la biomasa de las plantas con respecto al testigo, confirmando lo reportado por Allhdadi *et al.* (2007) y Zardashi *et al.* (2010).

Farrell *et al.* (2013) realizaron pruebas en plantas de *Lupinus albus* y reportaron que un polímero similar al hidrogel sintetizado a base de silicio resultaba ser una mejor opción para mitigar los efectos del estrés que los hidrogeles tradicionales [43], lo que da pie a continuar la investigación sobre la síntesis de polímeros capaces de retener agua y continuar optimizando esta tecnología.

Al analizar estos trabajos es posible apreciar que en general y salvo pocos casos, el hidrogel tiene un efecto positivo en las plantas de interés agrícola, y permite establecer nuevas dinámicas tanto de fertilización, como de riego, además de que se refuerza la idea de que la presencia de hidrogel es capaz de mitigar otros tipos de estrés como lo es el salino. Sin embargo, son pocos los estudios que estudian esta capacidad del hidrogel, por lo que es pronto para afirmarlo. Otro punto interesante que se observa es el hecho que al contrario de la tendencia en los estudios con plantas de interés forestal, es que aquí la

mayoría de los trabajos son realizados en campo, lo que refleja la preocupación de los investigadores en esta área por mantener la producción alimenticia ante los posibles cambios en los regímenes de humedad y la prolongación de las temporadas de sequía prevista debido a los efectos del cambio climático [34].

VII. CONCLUSIONES

El hidrogel es un polímero mitigador del estrés hídrico, ya que favorece significativamente el crecimiento y el incremento en biomasa de diversas especies de interés agrícola y forestal. También ha mostrado ser capaz de mitigar otros tipos de estrés como el salino, post-trasplante y modifica la dinámica de aplicación de fertilizantes en las plantas. Sin embargo, estas últimas bondades han sido poco estudiadas como para poder afirmar de que es capaz de lograrlo en todo tipo de cultivos y suelos, por lo que existe suficiente campo para expandir los estudios sobre otras las bondades del hidrogel.

También es importante mencionar que existen estudios en los que se observa que el hidrogel no aporta ningún beneficio en cuanto a supervivencia, crecimiento o incremento de biomasa en las plantas sometidas a estrés hídrico, por lo que es necesario ahondar en este tipo de estudios para determinar si esto fue debido a errores en los ensayos o si existen otros factores capaces de inhibir las bondades del hidrogel y de esta manera poder mejorar su desempeño y con ello mejorar las producciones agrícolas y forestales.

Referencias

- [1] H. Lambers, F. S. Chapin III, and T. L. Pons, *Plant Physiological Ecology*, 2nd ed. New York: Springer, 2008.
- [2] L. Taiz and E. Zeiger, *Fisiología vegetal. Volumen 2*. VV.AA, 2007.
- [3] L. P. Moreno F and L. Moreno F., “Respuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico. Una revisión,” *Agron. Colomb.*, vol. 27, no. 2, pp. 179–191, 2009.
- [4] J. E. Vélez, J. G. Álvarez-Herrera, and O. H. Alvarado-Sanabria, “El Estrés Hídrico en Cítricos (*Citrus* spp.): Una revisión,” *Orinoquia*, vol. 16, no. 2, pp. 32–39, 2012.
- [5] J. G. Pérez-Pérez, J. M. Robles, J. C. Tovar, and P. Botía, “Response to drought and salt stress of lemon ‘Fino 49’ under field conditions: Water relations, osmotic adjustment and gas exchange,” *Sci. Hortic. (Amsterdam)*, vol. 122, no. 1, pp. 83–90, 2009.
- [6] C. A. Rolando and K. M. Little, “Measuring water stress in *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden seedlings planted into pots,” *South African J. Bot.*, vol. 74, no. 1, pp. 133–138, 2008.
- [7] G. C. Nelson, M. W. Rosegrant, J. Koo, R. Robertson, T. Sulser, T. Zhu, C. Ringler, S. Msangi, A. Palazzo, M. Batka, M. Magalhaes, R. Valmonte-Santos, M. Ewing, and D. Lee, “Cambio Climático. El impacto en la agricultura y los costos de adaptación,” *Política Aliment. Inf. Inst. Int. Investig. sobre Políticas Aliment. IFPRI.CGIAR*, 2009.
- [8] J. M. Mirás-Avalos, R. Alcobendas, J. J. Alarcón, P. Valsesia, M. Génard, and E. Nicolás, “Assessment of the water stress effects on peach fruit quality and size using a fruit tree model, QualiTree,” *Agric. Water Manag.*, vol. 128, no. 0, pp. 1–12, 2013.
- [9] R. A. Francis, A. M. Gurnell, G. E. Petts, and P. J. Edwards, “Survival and growth responses of *Populus nigra*, *Salix elaeagnos* and *Alnus incana* cuttings to varying levels of hydric stress,” *For. Ecol. Manage.*, vol. 210, no. 1–3, pp. 291–301, 2005.
- [10] G. M. Pilar, “Consideraciones para el manejo de riego y mitigación de estrés en situación de restricción hídrica,” Instituto de Investigaciones Agropecuarias, 2010.
- [11] J. Marsal, M. Mata, A. Arbones, J. Del Campo, J. Girona, and G. Lopez, “Factors involved in alleviating water stress by partial crop removal in pear trees,” *Tree Physiol*, vol. 28, no. 9, pp. 1375–1382, 2008.
- [12] E. M. Ahmed, “Hydrogel: Preparation, characterization, and applications,” *J. Adv. Res.*, 2013.

- [13] J. Elisseeff, "Hydrogels: Structure starts to gel," *Nat Mater*, vol. 7, no. 4, pp. 271–273, Apr. 2008.
- [14] I. A. Katime Amashta, D. Katime Trabanca, and O. Katime Trabanca, *Los materiales inteligentes de este milenio los hidrogeles macromoleculares : síntesis, propiedades y aplicaciones*, 1st ed. Bilbao: Universidad del País Vasco, Servicio Editorial, 2004.
- [15] P. C. Nicolson and J. Vogt, "Soft contact lens polymers: An evolution," *Biomaterials*, vol. 22, no. 24, pp. 3273–3283, 2001.
- [16] S. Amin, S. Rajabnezhad, and K. Kohli, "Hydrogels as potential drug delivery systems," *Sci. Res. Essay*, vol. 4, no. 11, pp. 1175–1183, 2009.
- [17] M. Dragusin, D. Martin, M. Radoiu, R. Moraru, C. Oproiu, S. Marghitu, and T. Dumitrica, "Hydrogels used for medicine and agriculture," in *Gels*, M. Zr'inyi, Ed. Darmstadt: Steinkopff, 2007, pp. 123–125.
- [18] J. M. Gehring and A. J. Lewis III, "Effect of hydrogel on wilting and moisture stress of bedding plants," *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, no. 105, pp. 511–513, 1980.
- [19] Z. P. Tu, A. M. Armitage, and H. Vines, "Influence of an antitranspirant and a Stress, on photosynthesis and water loss of Cineraria during water," *HortScience*, vol. 20, pp. 386–388, 1985.
- [20] J. R. F.T. Davies, Castro-Jiménez, and S. A. Duray, "Mycorrhizae, Soil Amendments, Water Relations and Growth of Rosa multiflora under Reduced Irrigation Regimes," *ScientiaHorticulturae*, vol. 33, pp. 261–267, 1987.
- [21] Y. Wang, "Medium and hydrogel affect production and wilting of tropical ornamental plants," *HortScience*, no. 24, pp. 941–944, 1989.
- [22] W. C. Fonteno and T. E. Bilderback, "Impact of Hydrogel on Physical Properties of Coarse-structured Horticultural Substrates," *J. Am. Soc. Hort. Sci.*, vol. 118, no. 2, pp. 217–222, 1993.
- [23] A. Hüttermann, M. Zommodi, and K. Reise, "Addition of hydrogels to soil for prolonging the survival of *Pinus halepensis* seedlings subjected to drought," *Soil Tillage Res.*, vol. 50, no. 3–4, pp. 295–304, 1999.
- [24] A. I. Al-Humaid and A. E. Moftah, "Effects of Hydrophilic Polymer on the Survival of Buttonwood Seedlings Grown Under Drought Stress," *J. Plant Nutr.*, vol. 30, no. 1, pp. 53–66, 2007.
- [25] A. Barón Cortés, I. X. Barrera Ramírez, L. F. Boada Eslava, and G. Rodríguez Niño, "Evaluación de hidrogeles para aplicaciones agroforestales," *Ing. e Investig.*, vol. 27, no. 3, pp. 35–44, 2007.
- [26] D. S. Thomas, "Hydrogel applied to the root plug of subtropical eucalypt seedlings halves transplant death following planting," *For. Ecol. Manage.*, vol. 255, no. 3–4, pp. 1305–1314, 2008.
- [27] H. Agaba, L. J. Baguma Orikiriza, J. F. Osoto Esegu, J. Obua, J. D. Kabasa, and A. Hüttermann, "Effects of Hydrogel Amendment to Different Soils on Plant Available Water and Survival of Trees under Drought Conditions," *CLEAN – Soil, Air, Water*, vol. 38, no. 4, pp. 328–335, 2010.
- [28] R. S. Beniwal, R. Langenfeld-Heyser, and A. Polle, "Ectomycorrhiza and hydrogel protect hybrid poplar from water deficit and unravel plastic responses of xylem anatomy," *Environ. Exp. Bot.*, vol. 69, no. 2, pp. 189–197, 2010.
- [29] Y. Shi, J. Li, J. Shao, S. Deng, R. Wang, N. Li, J. Sun, H. Zhang, H. Zhu, Y. Zhang, X. Zheng, D. Zhou, A. Hüttermann, and S. Chen, "Effects of Stockosorb and Luquasorb polymers on salt and drought tolerance of *Populus popularis*," *Sci. Hort. (Amsterdam)*, vol. 124, no. 2, pp. 268–273, 2010.
- [30] K. Maldonado Benitez, R. Aldrete Arnulfo, J. López Upton, H. Vaquera Huerta, and V. M. Cetina Alcalá, "Producción de *Pinus greggii* Engelm. en mezclas de sustrato con hidrogel y riego en vivero," *Agrociencia*, vol. 45, no. 3, pp. 389–398, 2011.
- [31] L. J. B. Orikiriza, H. Agaba, G. Eilu, J. D. Kabasa, M. Worbes, and A. Hüttermann, "Effects of Hydrogels on Tree Seedling Performance in Temperate Soils before and after Water Stress," *J. Environ. Prot. (Irvine, Calif.)*, vol. 04, no. 07, pp. 713–721, 2013.
- [32] J. Akhter, K. Mahmood, K. A. Malik, A. Mardan, M. Ahmad, and M. M. Iqbal, "Effects of hydrogel amendment on water storage of sandy loam and loam soils and seedling growth of barley, wheat and chickpea," *PLANT SOIL Env.*, vol. 50, no. 10, pp. 463–469, 2004.
- [33] D. Geesing and U. Schmidhalter, "Influence of sodium polyacrylate on the water-holding capacity of three different soils and effects on growth of wheat," *Soil Use Manage.*, vol. 20, pp. 207–209, 2004.
- [34] J. Gornall, R. Betts, E. Burke, R. Clark, J. Camp, K. Willett, and A. Wiltshire, "Implications of climate change for agricultural productivity in the early twenty-first century," *Philos Trans R Soc L. B Biol Sci*, vol.

- 365, no. 1554, pp. 2973–2989, 2010.
- [35] G. B. Rojas, R. Aguilera, J. L. Prin, H. Cequea, J. Cumana, E. Rosales, and M. Ramírez, “Estudio de la germinación de semillas de tomate en suelos áridos extraídos de la península de Araya (Venezuela) al utilizar polímeros tipo hidrogeles,” *Rev. Iberoam. polímeros*, vol. 5, no. 1, pp. 17–27, 2004.
- [36] H. Nazarli, R. Reza Zardashti, Mohammad Darvishzadeh, and S. Najafi, “The Effect of Water Stress and Polymer on Water Use Efficiency, Yield and several Morphological Traits of Sunflower under Greenhouse Condition,” *Not. Sci. Biol.*, vol. 2, no. 4, pp. 53–58, 2010.
- [37] B. Hernández Santana, A. Peralta Martínez, E. Osmin A. Santos, and G. Gutiérrez Reyes, “Efecto del hidrogel sobre el rendimiento de semilla en tres cultivares de *Brachiaria* spp en el valle de Iguala, gro., México,” *Rev. electrónica Vet.*, vol. 8, no. 9, 2007.
- [38] F. Yazdani, I. Allahdadi, and G. A. Akbari, “Impact of superabsorbent polymer on yield and growth analysis of soybean (*Glycine max* L.) under drought stress condition,” *Pakistan J. Biol. Sci. PJBS*, vol. 10, no. 23, pp. 4190–4196, 2007.
- [39] S. S. Dorraji, A. Golchin, and S. Ahmadi, “The Effects of Hydrophilic Polymer and Soil Salinity on Corn Growth in Sandy and Loamy Soils,” *CLEAN – Soil, Air, Water*, vol. 38, no. 7, pp. 584–591, 2010.
- [40] H. Agaba, L. J. B. Oriquiriza, J. Obua, J. D. Kabasa, M. Worbes, and A. Hüttermann, “Hydrogel amendment to sandy soil reduces irrigation frequency and improves the biomass of *Agrostis stolonifera*,” *Agric. Sci.*, vol. 02, no. 04, pp. 544–550, 2011.
- [41] M. R. Islam, X. Xuzhang Sishuai, Mao, Z. Xingbao, A. E. Eneji, and H. Yuegao, “Superabsorbent polymers (SAP) enhance efficient and eco-friendly production of corn (*Zea mays* L.) in drought affected areas of northern China,” *African J. Biotechnol.*, vol. 10, no. 24, pp. 4887–4894, 2011.
- [42] Z. Moslemi, D. Habibi, A. Asgharzadeh, M. Reza Ardakani, A. Mohammadi, and A. Sakari, “Effects of super absorbent polymer and plant growth promoting rhizobacteria on yield and yield components of maize under drought stress and normal conditions,” *African J. Agric. Res.*, vol. 6, no. 19, pp. 4471–4476, 2011.
- [43] C. Farrell, X. Q. Ang, and J. P. Rayner, “Water-retention additives increase plant available water in green roof substrates,” *Ecol. Eng.*, vol. 52, pp. 112–118, 2013.