

**EVALUACIÓN DE HIDROGELES A PARTIR DE POLIGLICEROL COMO
ADITIVOS AGRÍCOLAS SOBRE LA GERMINACIÓN Y CRECIMIENTO DE
PLÁNTULAS DE FRÍJOL**

KELLY JOHANNA PARRA RODRÍGUEZ

MONICA PATRICIA SAAVEDRA PÉREZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-QUÍMICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

BUCARAMANGA

2015

**EVALUACIÓN DE HIDROGELES A PARTIR DE POLIGLICEROL COMO
ADITIVOS AGRÍCOLAS SOBRE LA GERMINACIÓN Y CRECIMIENTO DE
PLÁNTULAS DE FRÍJOL**

KELLY JOHANNA PARRA RODRÍGUEZ

MONICA PATRICIA SAAVEDRA PÉREZ

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Químico.**

Director:

GUSTAVO EMILIO RAMÍREZ CABALLERO

Ingeniero Químico, PhD

Codirector:

CAROLINA ARDILA SUÁREZ

Ingeniera Química, M.Eng

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-QUÍMICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

BUCARAMANGA

2015

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander, por permitirnos construir un futuro profesional, vivir esta gran experiencia, a la Escuela de Ingeniería Química y a todas sus directivas, por inundarnos de conocimiento y por enseñarnos siempre lo mejor, recalcando siempre la calidad y excelencia.

Al Doctor Gustavo Ramírez, por permitirnos hacer parte del grupo de investigación en polímeros, por brindarnos su confianza, y apoyo en este importante proceso para nuestras vidas.

A la ingeniera Carolina por su apoyo incondicional, colaboración, amistad y entrega total en la culminación de este proyecto de vida, por guiarnos por el camino de la excelencia y disciplina, por infundirnos su pensamiento de que “siempre se puede mejorar lo que ya está”.

Al Grupo de Investigación de polímeros y compañeros que allí trabajan, por aportarnos el conocimiento y brindarnos los medios necesarios para realizar este trabajo.

KELLY AGRADECE A:

Primero que todo agradezco a Dios por brindarme la fortaleza, confianza y el conocimiento necesarios para alcanzar esta meta y permitir que este momento se hiciera realidad. A Moni, por ser mi amiga, mi compañera, mi fiel confidente, mi “hermana”, por querer emprender esta hermosa tarea conmigo y brindarme su gran e incondicional apoyo. A mi Mamita que siempre es y será la mejor consejera de mi vida, por entenderme siempre, por ser mi fuente inspiración y levantarme después de cada tropiezo, mi fortaleza, mi guía, mi todo. A mi Papi, por sus buenos consejos y opiniones sabias respecto al trabajo realizado, por su apoyo incondicional, por guiarme por el mejor camino. A mi amor, por su apoyo incondicional, por su amor y comprensión ante mis estreses. A mis amigos y demás compañeros quienes me ayudaron a llegar hasta aquí e hicieron que el paso por la U fuera una bonita experiencia, con grandes, gratificantes y valiosos recuerdos. Mil gracias a todos y a los que se me escapan y Exitos !!

MONICA AGRADECE A:

Hoy quiero agradecer a mi Dios amado, al autor de mi fe, a la razón de mi vida quien por su infinito amor me ha permitido llegar hasta aquí, dándome las fuerzas, la sabiduría, y por sus infinitas bendiciones en esta hermosa carrera que un día emprendí de la mano de Él. Toda la gloria y honra sean para Dios quien hizo real este sueño. A mi padres hermosos por su apoyo incondicional, por su dedicación y esfuerzo para darme siempre lo mejor, por su gran ejemplo de vida, y por enseñarme a amar a Dios por encima de todas las cosas, por sus oraciones quien me mantienen de pie y por depositar en mí su confianza y animarme a seguir adelante. Los amo con todo mi corazón son una bendición de Dios. A mis hermanos por su apoyo, por sus alegrías, por su incondicionalidad, por creer en mí y por estar presentes en cada etapa de mi vida. A mi Esposito Hermoso, un regalo de Dios, por demostrarme su gran amor sincero e incondicional, por su paciencia, su confianza, por sus palabras de ánimo y abrazos reconfortantes, por ser el motor de mi felicidad y estar siempre a mi lado; esto es un sueño compartido, es uno de los tantos logros que alcanzaremos de la mano de Dios. TE AMO con todo mi corazón. A mi mejor amiga Yeka, por tan valiosa amistad, por ser mi confidente, mi compañera de aventuras, por tantos momentos de alegría compartidos, por estar siempre a mi lado en los momentos más emotivos de mi vida. Emprendimos este camino juntas y hoy podemos decir que lo hemos logrado. Mil gracias por todo. A kellyta mi compañera de Tesis, mi compañera de aventuras, mi gran amiga, por apoyarme y aguantarme en este gran proyecto, por su paciencia, su confianza y por los memorables momentos compartidos. A mis amigos y compañeros que hicieron parte de este proceso, de esta bella experiencia, de mi paso por la U, que Dios les depare muchos triunfos y éxitos.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	18
1. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	24
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	25
1.1.1 REACTIVOS Y MATERIALES.	25
1.1.2 SÍNTESIS.	26
1.1.3 CARACTERIZACIÓN DE HIDROGEL	27
1.1.4 APLICACIÓN AGRÍCOLA.....	28
2. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	33
2.1 HIDROGEL OBTENIDO.....	33
2.1.1 PRUEBAS DE ABSORCIÓN	33
2.1.2 ESPECTROSCOPIA INFRARROJO (IR)	35
2.1.3 PRUBA DE DESORCIÓN	36
2.2 EVALUACIÓN AGRÍCOLA.....	38
2.2.1 ANÁLISIS DEL SUELO.....	38
2.2.2 EFECTO DE LOS HIDROGELES EN LA GERMINACIÓN DE SEMILLAS DE FRÍJOL.	40
2.2.3 EFECTO DE LOS HIDROGELES SOBRE EL CRECIMIENTO DE LAS PLÁNTULAS DE FRÍJOL.....	42
3. CONCLUSIONES	46

4. RECOMENDACIONES.....	47
CITAS BIBLIOGRAFICAS	48
BIBLIOGRAFÍA.....	55
ANEXOS	56

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Efecto del hinchamiento del hidrogel en la porosidad del suelo. (a) hidrogel seco. (b) hidrogel hinchado [23].....	23
Figura 2. Metodología empleada en la síntesis de hidrogeles de tipo HG1 Y HG2 y su respectiva caracterización.....	24
Figura 3. Metodología experimental para la evaluación los hidrogeles sintetizados.....	25
Figura 4. Montaje empleado en la síntesis de hidrogeles. 1. Plancha de calentamiento; 2. Baño de aceite; 3. Reactor; 4.Termómetro; 5.Burbujeador; 6.Condensador; 7. Bomba de vacío.....	26
Figura 5. Etapas de germinación epigea experimentadas por las semillas de frijol.....	27
Figura 6. Resultado promedio de las pruebas de hinchamiento para el hidrogel de poliglicerol entrecruzado con ácido cítrico (HG1) y poliglicerol entrecruzado con una mezcla de ácido cítrico y oleico (HG2).....	34
Figura 7. Espectro IR para los tipos de xerogel. (a) Poliglicerol entrecruzado con ácido cítrico HG1. (b) Poliglicerol entrecruzado con una mezcla de ácidos cítrico y oleico (HG2).....	35
Figura 8. Termograma a 28 °C, de hidrogeles de poliglicerol entrecruzados con ácido cítrico (HG1) y con una mezcla de ácido cítrico y oleico (HG2).....	37

Figura 9. Número de plántulas germinadas en cada nivel de experimentación, según las etapas de germinación epígea a diferentes días.....	40
Figura 10. Número de semillas germinadas en diferentes días para los niveles de experimentación: suelo sin hidrogel, suelo con HG2 y suelo con HG1.....	41
Figura 11. Altura promedio alcanzada por las plántulas en los niveles de experimentación: suelo sin hidrogel, suelo con HG2 y suelo con HG1.....	43
Figura 12. Área foliar promedio de plántulas en los niveles de experimentación. (a) en el día 10 después de la siembra. (b) al término de la experimentación en el día 20.....	44
Figura 13. Ganancia de masa de las plantas en los niveles de experimentación.....	45

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Diseño experimental para la aplicación agrícola.....	29
Tabla 2. Cantidad en peso de hidrogel y suelo utilizados en la siembra.....	30
Tabla 3. Tabla de características físicas de los hidrogeles sintetizados.....	33
Tabla 4. Resultados pruebas de retención de agua en el suelo en los tres niveles de experimentación.....	39

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Protocolo para la síntesis de hidrogel (HG1).....	56
ANEXO B. Protocolo para la síntesis del hidrogel (HG2).....	60
ANEXO C. Etapa de experimentación preliminar.....	64
ANEXO D. Análisis de resultados y discusión de la experimentación preliminar.....	67
ANEXO E. Cálculo del área foliar de las plántulas utilizando el software ImageJ.....	79
ANEXO F. Resultados de las pruebas de absorción de las muestras sintetizadas.....	84
ANEXO G. Análisis fisicoquímico de las muestras de suelo.....	86
ANEXO H. Análisis ANOVA en la evaluación del crecimiento de las plántulas de fríjol.....	87
ANEXO I. Resultados de desarrollo de plántulas por conteo de hojas.....	88
ANEXO J. Evidencias del estudio de la aplicación agrícola de hidrogeles.....	91

RESUMEN

TITULO: EVALUACIÓN DE HIDROGELES A PARTIR DE POLIGLICEROL COMO ADITIVOS AGRÍCOLAS SOBRE LA GERMINACIÓN Y CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS DE FRÍJOL*

AUTORES: KELLY JOHANNA PARRA RODRÍGUEZ**
MONICA PATRICIA SAAVEDRA PÉREZ

PALABRAS CLAVES: Poliglicerol, hidrogel, acondicionadores, suelo, germinación, plántulas, desarrollo biológico, área foliar.

DESCRIPCION:

En el presente trabajo de investigación, se estudió la germinación y crecimiento de plántulas de frijol en suelo extraído de la región de la Mesa de los Santos Santander, acondicionado con dos tipos de hidrogeles con gran capacidad de absorción; la liberación de agua de estos materiales para la aplicación agrícola realizada fue evaluada.

Los polímeros fueron sintetizados en el laboratorio por medio de reacciones de esterificación entre el poliglicerol y ácido cítrico como agente entrecruzante para el primer tipo (HG1) y una mezcla de ácido cítrico y ácido oleico para el segundo tipo (HG2) de hidrogel. Para la germinación y crecimiento de las semillas se siguió un diseño experimental considerando como única variable el tipo de hidrogel, a tres niveles; suelo acondicionado con (HG1), suelo acondicionado con (HG2) y suelo sin hidrogel (testigo). Para estos niveles se sembraron 100 réplicas con una concentración fija de 1% en peso seco de hidrogel respecto al suelo, y se estableció un riego en cada 10 días.

La adición del hidrogel de tipo HG2 en el suelo favoreció la germinación en un 100% respecto al suelo testigo y aumentó el desarrollo biológico de las plántulas sembradas de manera significativa. Se logró un mayor aprovechamiento del agua de riego en presencia de hidrogel, evitando el drenaje excesivo y la evaporación de la misma. Además a medida que el suelo se seca, el hidrogel libera el agua almacenada, lo que aumenta las reservas hídricas y la productividad del suelo.

*Proyecto de grado para optar el título de Ingeniero Químico

** Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: PhD. Gustavo Emilio Ramírez. Codirector: Ing. Carolina Ardila Suárez

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF HYDROGELS DERIVED FROM POLYGLYCEROL AS AGRICULTURAL ADDITIVES ON THE GERMINATION AND GROWTH OF BEAN SEEDLINGS *

AUTHORS: KELLY JOHANNA PARRA RODRIGUEZ **

MONICA PATRICIA PEREZ SAAVEDRA

KEYWORDS: Polyglycerol, hydrogel, conditioners, soil, germination, seedling, biological development, leaf area.

DESCRIPTION:

In this research, it was studied the germination and seedling growth of beans in soil removed from the Mesa de Los Santos region, Santander. The soil was conditioned with two types of hydrogels with high absorption capacity; their water uptake was evaluated towards the agricultural application.

The hydrogels polymers were synthesized at laboratory scale by esterification reactions between polyglycerol and citric acid as crosslinking agent, for the first hydrogel type (HG1); the second one, hydrogel HG2, was crosslinked with a mixture of citric acid and oleic acid. For germination and seedling growth an experimental design was followed considering only one variable, the type of hydrogel, analyzed in three levels: soil conditioning with (HG1), soil conditioning with (HG2) and soil without hydrogel (control). 100 replicates for these levels were made at a fixed 1% concentration -dry weight relative to the ground hydrogel- and, irrigation was established in 10 days.

The addition of hydrogel type HG2 on the soil favored the germination by 100% compared to control soil. Also, this material increased significantly the biological development of seedlings planted. A better use of irrigation water -in the presence of hydrogel- was achieved. Thus, avoiding excessive water drainage and evaporation. In addition, as the soil dries, the hydrogel releases the stored water, which increases water reserves and soil productivity.

* Graduation Project to qualify for the degree in chemical engineering.

** Faculty of Physical and Chemical Engineering. Chemical Engineering Department. Director: PhD. Gustavo E. Ramírez Codirector: Eng. Carolina Ardila Suárez.

ABREVIATURAS

PG Poliglicerol

AC Ácido Cítrico

AO Ácido oleico

AE Agente entrecruzante

HG Hidrogel

IR Espectroscopia Infrarroja

TGA Análisis Termogravimétrico

GIP Grupo de Investigación en Polímeros

HG1 Hidrogel sintetizado a partir de glicerol, con ácido cítrico como agente entrecruzante.

HG2 Hidrogel sintetizado a partir de glicerol, con una mezcla de ácido cítrico y ácido oleico como agentes entrecruzantes.

INTRODUCCIÓN

Actualmente existe una preocupación mundial respecto al agotamiento de los recursos petrolíferos y los problemas ambientales asociados con las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que provoca un enorme interés en el desarrollo de materiales de origen biológico. Esto también ha dado paso al rápido crecimiento de la producción de biocombustibles como el biodiesel mediante la transesterificación de materias primas vegetales con un alcohol. Un importante subproducto de este proceso es el glicerol [1], también conocido como glicerina o propano-1,2, 3-triol [2].

La producción de biodiesel ha aumentado desde 959 hasta 15 760 millones de litros entre 2001-2009 y se espera que llegue a 45 291 millones de litros por año en 2020 [3]. Este incremento acelerado a nivel mundial, genera un gran excedente de glicerol, lo que ocasiona una disminución sustancial en su precio, llegando al record de \$ EE.UU. 0,05 / lb [3,4].

Ante la necesidad de disminuir el impacto causado por el glicerol crudo, investigaciones se enfocan en encontrar aplicaciones donde este subproducto sea empleado como materia prima de productos de valor añadido. Por tanto para algunas aplicaciones se requiere retirar las impurezas del glicerol crudo tales como: residuos de catalizador, residuos de metanol, agua, jabones, ácidos grasos libres y sales, con el fin de obtener glicerol puro. Este compuesto posee una estructura biocompatible, biodegradable y otras propiedades, que le permiten sustituir a principales derivados químicos del petróleo. En la actualidad, el glicerol puro es utilizado en productos farmacéuticos, cuidado personal, alimentos y cosméticos [2]. Además, como monómero de base biológica de alta funcionalidad, es un candidato interesante para la producción de polímeros verdes o sostenibles.

Recientemente Salehpour y Dubé [5] han estudiado que la polimerización por crecimiento en etapas por medio de reacciones de eterificación, pueden convertir el glicerol puro en poliglicerol (PG); compuesto que contiene grupos hidroxilos unidos por enlaces éter, brindándole sitios disponibles para la reticulación, con características hidrófilas, haciendo de este en un buen material de partida para la síntesis de hidrogeles; contribuyendo de esta manera en la búsqueda de nuevas aplicaciones del glicerol.

Estos hidrogeles a partir de poliglicerol pueden ser descritos como redes tridimensionales hidrófilas, capaces de absorber grandes cantidades de agua u otros fluidos biológicos, aumentando su volumen considerablemente pero manteniendo su forma. Los hidrogeles hinchados tienen simultáneamente las propiedades cohesivas de los sólidos y las propiedades difusivas de transporte de los líquidos [6]. Estos materiales pueden someterse a un cambio en el volumen (hinchamiento / encogimiento) basado en cambios de las condiciones ambientales, tales como temperatura, pH, fuerza iónica y la naturaleza del disolvente. Por ende se les confirió el título de materiales inteligentes [7].

Gracias a su naturaleza, las tecnologías de hidrogel se pueden aplicar a los productos de higiene [8], agricultura, forestales y horticultura [9], sistemas de administración de fármacos [10], deshidratación de carbón [11], nieve artificial [8], aditivos alimentarios [12], productos farmacéuticos [13], aplicaciones biomédicas [14,15] de ingeniería de tejidos y medicinas regenerativas [16, 17], de diagnóstico [18], vendaje de heridas [19], y biosensores [20,21].

Sin embargo, la mayoría de los polímeros hidrofílicos que se encuentran actualmente en el mercado son productos a base de acrilato; por tanto, son tóxicos y no biodegradables, lo que genera un impacto en la agricultura y demás aplicaciones relacionadas con el consumo humano [22]. Como resultado, el

enfoque hacia un medio ambiente sostenible toma relevancia llevando a los fabricantes de hidrogeles a considerar el desarrollo de superabsorbentes amigables, lo que aumenta su uso en la agricultura especialmente en zonas influenciadas por la aridez y las condiciones hostiles de los suelos.[23].

El principal factor limitante en zonas de clima semiárido, es la disponibilidad de agua, debido a que presentan una descompensación entre la cantidad de agua que potencialmente puede pasar a la atmósfera por evapotranspiración, y la cantidad de agua de lluvia que realmente reciben estas zonas [24]. Estas regiones presentan una demanda evaporativa atmosférica elevada que depende fundamentalmente de la radiación solar, la presión de vapor del aire y la velocidad del viento.

Es el caso de la región de la Mesa de los Santos - Santander, ubicada en la cordillera oriental, zona de escasa cobertura vegetal, razón por la que en época de verano la mayoría de las quebradas permanecen secas, y algunas solo son canales naturales de drenaje que únicamente transportan caudal en el momento en que se presenta la lluvia [25]. Cabe resaltar que en esta región existe escasez de agua, hecho que se ha venido acentuando con el paso de los años. La ausencia de precipitaciones, ha provocado que la germinación de semillas y desarrollo de las plantas estén críticamente restringidas debido al bajo contenido de humedad del suelo convirtiéndolo en poco apto para la producción agrícola [26]. Para esta región se propone evaluar la viabilidad del uso de hidrogeles como una alternativa para mitigar esta problemática.

Gran cantidad de estudios, se han enfocado en realizar ensayos que demuestran que el uso extensivo de polímeros hidroabsorbentes, mejora la capacidad de retención de agua en el suelo, favoreciendo el crecimiento de las plantas, [27] lo que constituye un depósito de agua adicional para el sistema suelo-planta,

reduciendo el estrés hídrico. Al mezclar el hidrogel con el suelo se logra, por un lado, aprovechar mejor el agua de lluvia o riego al perderse menor cantidad de agua por filtración, y por otro lado se consigue disminuir la evaporación de la misma. Estos factores son suficientes para mejorar la actividad biológica y aumentar la producción del suelo. Además, el uso de polímeros produce una mejora en la estructura del suelo y la aireación del mismo; lo que permite la recuperación de zonas semiáridas o terrenos de cultivo abandonado y poco fértil cuando se emplea de forma extensiva [28-30].

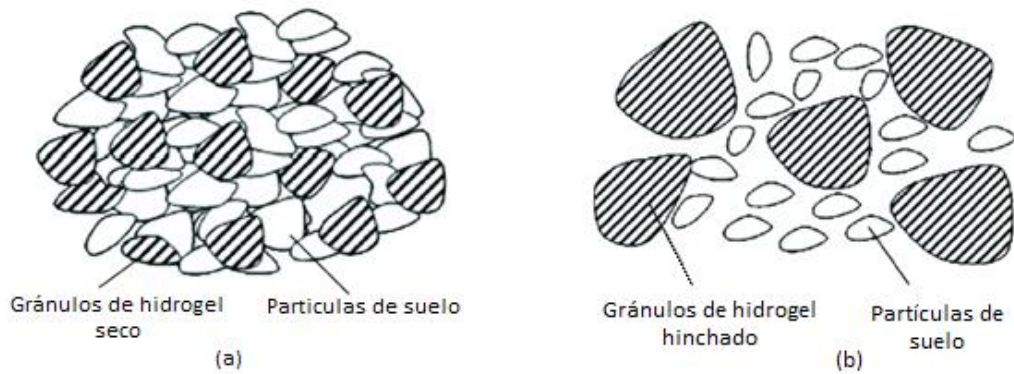
Flannery y Johnson [31] han informado que el uso de polímeros hidrófilos aumenta la cantidad de humedad disponible en la zona de la raíz, lo que permite intervalos más largos entre irrigaciones. Se han mostrado resultados positivos en germinación, producción y supervivencia de repollos y maíz [32], donde se han alcanzado incrementos en la producción hasta del 10% con el empleo de la misma cantidad de agua. Además, otras investigaciones, han estudiado la germinación y crecimiento de otras especies como palma [33], rábanos, acacias, [34], cebada, trigo, garbanzos [35], tomate cherry [23], eucaliptus [36], pinos halepensis [37], entre otros [38-40]. Estos estudios reportan la implementación de diferentes clases de hidrogeles en distintos tipos de suelos, donde se alcanzan resultados eficientes.

Recientemente, el grupo de investigación en polímeros de la Universidad Industrial de Santander, ha realizado estudios encaminados en la búsqueda de nuevos campos de aplicación del glicerol como estructura base de materiales biodegradables; entre ellos la síntesis de hidrogeles reticulados con diferentes agentes entrecruzantes para el estudio de sus propiedades físicas, químicas y mecánicas; cabe resaltar que para la síntesis de estos materiales, se emplea glicerol puro, puesto que el glicerol crudo no polimeriza debido a sus impurezas. Estos hidrogeles aún no han sido objeto de estudio en algún campo de aplicación, por ende surge la propuesta de su evaluación agrícola.

El objetivo del presente trabajo de investigación, es evaluar el efecto de incorporar hidrogeles en un suelo de tipo franco-arcillo-arenoso extraído de la región de la Mesa de los Santos, sobre la respuesta de germinación y crecimiento de plántulas de frijol con respecto a un suelo testigo (suelo sin hidrogel). Para ello se realiza previamente la síntesis de dos clases de hidrogeles a partir de glicerol, uno entrecruzado únicamente con ácido cítrico (HG1) [41] y otro empleando una mezcla de ácido cítrico y oleico como entrecruzantes (HG2) [42]. Inicialmente se realiza la polimerización por etapas del glicerol a través de reacciones de eterificación, seguidas de la esterificación del poliglicerol con los respectivos agentes entrecruzantes. Posteriormente se realiza la caracterización de los materiales, por medio de pruebas de absorción-desorción y análisis infrarrojo (IR).

Basado en pruebas preliminares, para el cultivo de plántulas de frijol se desarrolla un diseño de experimentos de una variable: tipo de hidrogel, a tres niveles: suelo con HG1, HG2 y sin hidrogel. Para las condiciones donde se adiciona hidrogel, se fija una concentración de 1% en peso seco respecto al suelo y se establece el ciclo de riego en cada 10 días para todas las condiciones. En cuanto a la siembra, se mezcla el hidrogel con el suelo en la proximidad de la semilla. Al aplicar el riego el hidrogel absorbe y retiene el agua, evitando así una rápida pérdida de agua por evaporación y drenaje. A medida que el suelo se seca, el hidrogel libera el agua almacenada de una manera sostenida a través de un mecanismo de difusión, manteniendo el suelo húmedo durante largos períodos. Una ventaja adicional en mezclar el hidrogel con el suelo es que los gránulos de hidrogel, aumentan su tamaño después del hinchamiento, incrementando así la porosidad del suelo y proporcionar una mejor oxigenación de las raíces de las plantas, como se esquematiza en la Figura 1. [23]

Figura 1. Efecto del hinchamiento del hidrogel en la porosidad del suelo. (a) hidrogel seco. (b) hidrogel hinchado [23].



Finalmente, con el uso de los hidrogeles sintetizados en el Grupo de Investigación en Polímeros, se espera contribuir en el desarrollo de nuevas alternativas, para combatir la sequía en la región de la Mesa de los Santos y a su vez brindar un aporte significativo en la búsqueda de nuevos materiales de alto valor agregado a partir del glicerol.

1. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para el desarrollo experimental del presente trabajo, se llevaron a cabo dos etapas secuenciales como se muestra en la figura 2 y 3. En la primera se realizó la síntesis respectiva de cada tipo de hidrogel y en la segunda etapa se desarrolló el procedimiento para evaluar la aplicación agrícola del material sintetizado anteriormente.

Figura 2. Metodología empleada en la síntesis de hidrogeles de tipo HG1 Y HG2 y su respectiva caracterización.

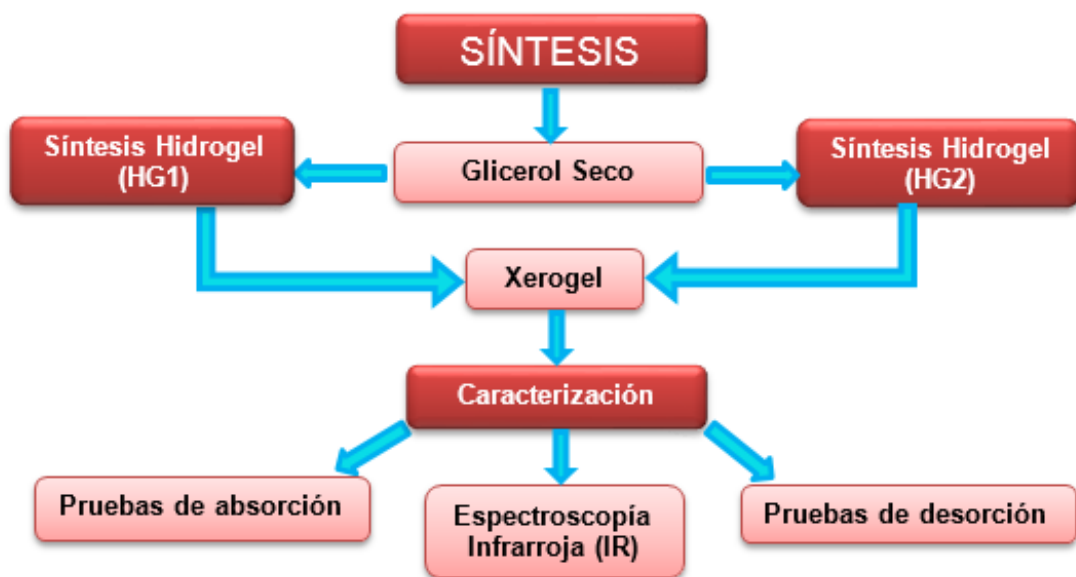
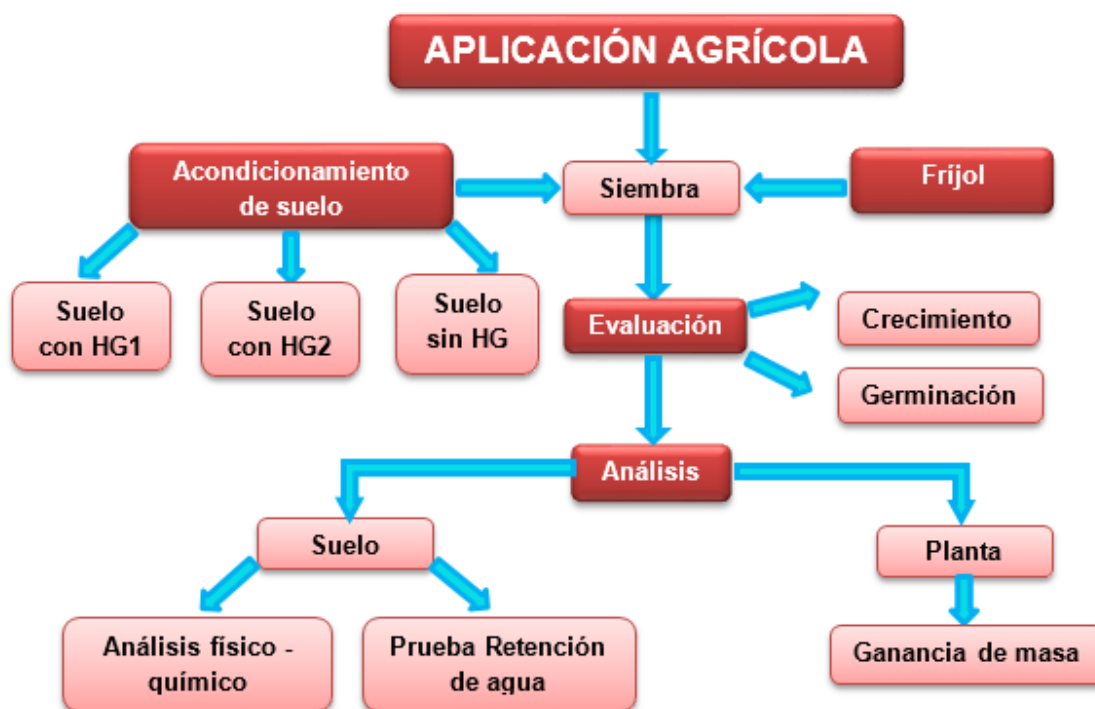


Figura 3. Metodología experimental para la evaluación los hidrogeles sintetizados.

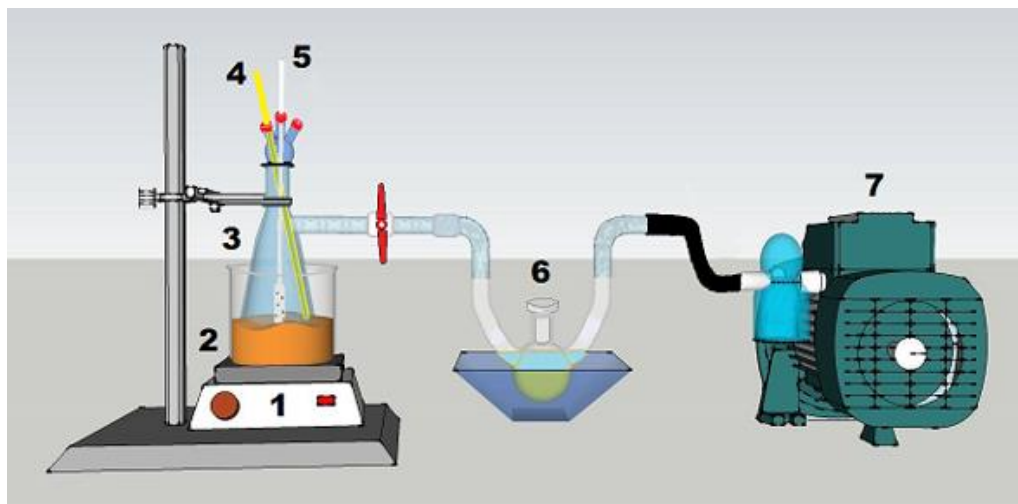


1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

1.1.1 REACTIVOS Y MATERIALES. La síntesis de hidrogeles se desarrolló utilizando glicerol al 85% v/v de Merck como materia prima del polímero a esterificar, ácido sulfúrico como catalizador al 95% de pureza de Merck, ácidos cítrico y oleico comerciales de Suquín Ltda y Laboratorios León respectivamente como agentes entrecruzantes.

El montaje que se empleó para la polimerización y posterior esterificación es el mismo para ambos tipos de hidrogel HG1 y HG2 como se muestra en la figura 4, y consta de los siguientes elementos: un reactor de vidrio de 50 ml con tres entradas, la primera permite la entrada de nitrógeno con el fin de mantener una atmósfera inerte, la segunda permite el control de la temperatura de reacción por medio de un termómetro y por último una entrada para la adición del catalizador y reactivos.

Figura 4. Montaje empleado en la síntesis de hidrogeles. 1. Plancha de calentamiento; 2. Baño de aceite; 3. Reactor; 4. Termómetro; 5. Burbujeador; 6. Condensador; 7. Bomba de vacío.



Además el reactor cuenta con una salida lateral que tiene una válvula de escape para el vapor de agua, conectada a un condensador en un baño de hielo, y éste a una bomba de vacío con trampa permitiendo de esta manera el desplazamiento del equilibrio de la reacción hacia la formación de productos principales. La fuente de energía térmica para la reacción es proporcionada por una plancha de calentamiento, a través de la transferencia de calor desde un baño de aceite mineral.

1.1.2 SÍNTESIS. Se toma como base para la síntesis, aquellas condiciones de reacción en las cuales se obtuvieron hidrogeles con la mayor capacidad de absorción según trabajos reportados anteriormente en el grupo de investigación en polímeros [41, 42].

1.1.2.1 Síntesis de hidrogel a partir de poliglicerol con ácido cítrico como entrecruzante (HG1). Inicialmente se llevó a cabo la polimerización por condensación del glicerol, utilizando ácido sulfúrico al 4,8% en peso como

catalizador con el fin de obtener poliglicerol de alto peso molecular, posteriormente el poliglicerol se esterificó con ácido cítrico como agente entrecruzante en relación molar de 1:1,19 (ver protocolo en Anexo A). Finalmente se logró sintetizar un hidrogel con una capacidad de absorción hasta de 12 veces su peso seco. [41]

1.1.2.2 Síntesis de hidrogel a partir de poliglicerol, entrecruzado con una mezcla de ácido oleico y ácido cítrico (HG2). La reacción de polimerización del glicerol se realizó de la misma manera que para el hidrogel HG1. Para la esterificación se utilizó una mezcla de ácidos oleico y cítrico como agentes entrecruzantes en relación molar de 1:0,5 de poliglicerol y mezcla de ácidos (90% de ácido cítrico y 10% de oleico) (ver protocolo en Anexo B); obteniendo un hidrogel con capacidad de absorción hasta de 7 veces su peso seco. [42]

1.1.2.3 Obtención del Xerogel. Con el fin de disminuir la acidez causada por la naturaleza ácida de su estructura, las muestras de hidrogel obtenidas en cada síntesis se someten a un lavado continuo con agua destilada, hasta que el pH este comprendido en un rango de 3 a 5. Tras el lavado, el hidrogel hinchado se pone a secar sobre papel filtro al ambiente, por 4 días aproximadamente; y se obtiene un sólido seco denominado Xerogel, siendo este el material a utilizar en la aplicación agrícola y demás caracterizaciones realizadas en este proyecto.

1.1.3 CARACTERIZACIÓN DE HIDROGEL

Las muestras de xerogel obtenidas para cada tipo HG1 Y HG2, se someten a las siguientes pruebas y análisis de laboratorio.

1.1.3.1 Pruebas de absorción. Para la realización de esta prueba se toma una pequeña porción de las muestras secas (xerogeles), se pesan y luego se

sumergen en agua destilada por 24 horas. Seguidamente se retiran del agua destilada, se seca el exceso de agua y se pesa la muestra hinchada. Para determinar el porcentaje de absorción de agua, se emplea la siguiente ecuación:

$$\%H = \frac{W_H - W_S}{W_S} \times 100\% \quad [1]$$

Dónde: W_H = peso de la muestra hinchada; W_S = peso de la muestra seca.

1.1.3.2 Pruebas de desorción (TGA). Para esta prueba, se utiliza un análisis termogravimétrico, con el fin de determinar la pérdida de peso de cada hidrogel en función del tiempo durante 1200 minutos bajo condiciones ideales. El equipo empleado fue un Analizador Termogravimétrico TA2050. Las muestra de xerogel HG1 (PG: AC) y HG2 (PG: AE), se hinchan en agua destilada por 24 horas, se pesan y se cargan en el equipo. Se fija una isoterma en 28 °C (temperatura a la que se encuentra el suelo en la aplicación agrícola), con un flujo de aire de 2ml/min.

1.1.3.3 Espectroscopía infrarroja (IR). El análisis IR se realiza con el fin de identificar la presencia de grupos funcionales del material sintetizado. El espectro se obtuvo en modo transmitancia en rango de 4000 a 500 cm^{-1} , la muestra fue analizada por un espectrómetro FT-IR Thermo Scientific Nicolet iS50.

1.1.4 APLICACIÓN AGRÍCOLA

Con el propósito de determinar el diseño de experimentos para evaluar la aplicación agrícola de los dos tipos de hidrogeles HG1 y HG2, se realiza una experimentación preliminar para reducir el número de variables a estudiar.

1.1.4.1 Experimentación preliminar. Se evalúa la germinación y crecimiento de tres especies de plántulas: tomate (*Lycopersicum esculentum*), pimentón (*Capsicum annuum*) y frijol (*Phaseolus Vulgaris*), en suelo franco arcilloso arenoso en presencia de cada tipo de hidrogel, incluyendo los tratamientos testigo (suelo sin hidrogel). El diseño de experimentación previa se muestra en el anexo C.

El resultado de la experimentación previa fue base para la definición del diseño de experimentos en este proyecto y se muestra en el anexo D.

1.1.4.2 Diseño de experimentos. A partir de los resultados obtenidos de la experimentación preliminar, se decide realizar el estudio aplicado a plántulas de frijol, debido a su rápida germinación y desarrollo. Por otra parte se fijan: ciclo de riego en 10 días, condición de adición de HG1 y HG2 al suelo de manera seca y concentración fija de cada hidrogel en 1% p/p respecto al suelo.

Para el diseño experimental se toma como única variable el tipo de hidrogel a tres niveles: suelo con HG1, Suelo con HG2 y suelo sin hidrogel (testigo) que sirve como patrón de comparación. El diseño de experimentos se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Diseño experimental para la aplicación agrícola.

Nivel	Tipo de Hidrogel
1	Suelo sin HG (testigo)
2	Suelo con HG2
3	Suelo con HG1

1.1.4.2.1 Siembra. Para cada condición de la tabla 1 se sembraron 100 réplicas, usando recipientes con capacidad de 90 ml en donde se introdujo un frijol y la mezcla suelo-hidrogel en cada uno de ellos, en proporciones como se muestra en la tabla 2; para un total de 300 tratamientos incluyendo los 100 testigos. Se

mantuvo un riego con una cantidad de agua del grifo de 30 ml cada 10 días por un periodo de 20 días.

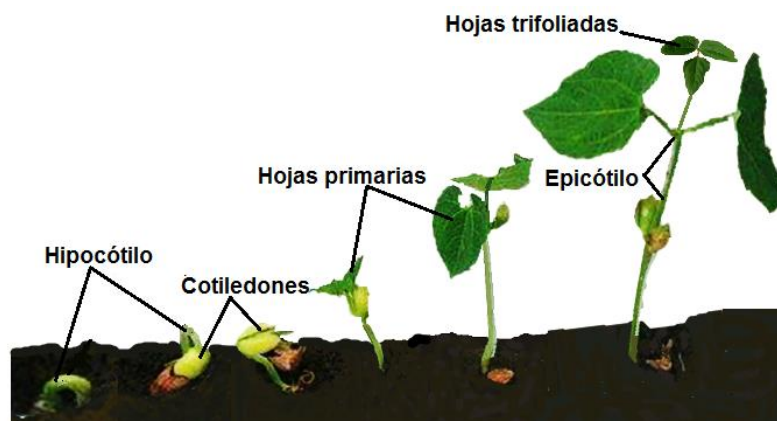
Tabla 2. Cantidad en peso de hidrogel y suelo utilizados en la siembra.

Componentes	Cantidad (g)
HG1	0.6039
HG2	0.6039
Suelo (g)	60.39

1.1.4.2.2 Evaluación. Para cuantificar el efecto de cada tipo de hidrogel sobre el cultivo de plántulas de frijol, se toman como variables de respuesta la germinación y el crecimiento.

1.1.4.2.2.1 Germinación. Este proceso comienza cuando la semilla que se ha sembrado absorbe agua y se hincha; para el análisis se tienen en cuenta las etapas de germinación epigea que experimenta la semilla de frijol de acuerdo a la figura 5.

Figura 5. Etapas de germinación epigea experimentadas por las semillas de frijol.



Una vez la semilla dispone de condiciones para germinar (agua), aparece en primer lugar la radícula; la cual se alarga para convertirse en raíz primaria. En segundo lugar emerge el hipocótilo para dar paso a la salida de los cotiledones sobre la superficie del suelo; posteriormente ocurre el enderezamiento del mismo, por su parte, los cotiledones una vez que emergen y se despliegan, dan lugar al crecimiento del epicótilo; que corresponde a la porción del tallo ubicado entre los cotiledones y el primer par de hojas. Seguidamente la plántula continúa su crecimiento y desarrollo biológico.

De acuerdo a las etapas descritas anteriormente, se tomó un registro diario de los cambios observados en cada una de ellas utilizando la siguiente nomenclatura: R: aparición de la radícula, C: emergencia del cotiledón con enderezamiento del hipocótilo, E: salida del epicótilo o tallo principal a partir del cotiledón (primeras hojas)

1.1.4.2.2 Crecimiento. Se efectúa un análisis funcional el cual comprende medidas de altura, número de hojas y área foliar, a intervalos de tiempos frecuentes en las plántulas de frijol. Para la altura, se hace un seguimiento diario en centímetros (cm), medida desde la base de la planta hasta la base del pecíolo de la última hoja emitida en cada plántula germinada. Para el área foliar, se mide la superficie de las hojas fotosintéticamente activas por el método directo, con un análisis de imágenes que consiste en fotografiar cada hoja de la planta y mediante el software ImageJ se calcula el área foliar tomando como referencia de escala el largo de cada hoja [43]. (Ver anexo E). Estas mediciones se realizan con el fin de cuantificar el desarrollo que obtienen las plántulas sembradas en cada condición en función del tiempo, desde el momento de la siembra.

1.1.4.2.3 Análisis.

1.1.4.2.3.1 Análisis fisicoquímico. Las características físico-químicas del suelo deben ser conocidas, ya que el crecimiento y desarrollo de los cultivos están en relación directa con los nutrientes y las características de los suelos. Para ello

se toma un kilogramo (Kg) de muestra de suelo extraído de la Mesa de los Santos, y por medio del Laboratorio Químico de suelos, convenio Gobernación de Santander y Universidad Industrial de Santander, se realizan los análisis de caracterización y elementos menores de la muestra; de esta manera se conoce el porcentaje (%) de arena, arcilla y limo, pH, textura, materia orgánica, Ca, Mg, Na, K, Al, elementos menores (Zn, Cu, Fe, B y Mn) antes y después de la experimentación. Estos análisis se realizan con el fin de evaluar el efecto sobre la composición química del suelo al incorporarle hidrogeles en la aplicación agrícola del presente trabajo.

1.1.4.2.3.2 Prueba de retención de agua del suelo. Se utiliza el método gravimétrico para establecer el contenido de humedad con base en el peso seco de la muestra de suelo. La muestra es pesada, secada en un horno a 105 °C durante 24 horas, determinándose mediante una balanza el peso del agua y el peso de suelo seco [44]. Se calcula la retención de agua en el suelo mediante la fórmula.

$$\%R = \frac{S_H - S_S}{S_S} \quad [2]$$

Dónde: S_H = Peso de suelo húmedo; S_S = Peso de suelo seco.

1.1.4.2.3.3 Ganancia de masa de las plantas. La ganancia de masa se calcula con el peso fresco y seco de las plantas, y se realiza para estudiar la cantidad de biomasa que ha ganado la planta durante el periodo de experimentación, reflejando, de esta manera el desarrollo biológico de las mismas. Para esto, una vez terminado el periodo experimental, se eligen las cinco plantas con mejor desarrollo vegetal (longitud de planta, cantidad y tamaño de hojas) de cada condición y se mide su peso fresco. Seguidamente se colocan a secar en el horno a 60°C durante 48 horas y se toma el peso seco para cada condición [45]. Finalmente se calcula la ganancia de masa, con la diferencia entre el peso seco y peso fresco de las plantas.

2. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

2.1 HIDROGEL OBTENIDO

Los hidrogeles se sintetizaron de acuerdo a los protocolos establecidos en la metodología experimental para cada tipo HG1 y HG2, logrando la obtención de dos materiales poliméricos, con características físicas similares a las citadas en la literatura [41,42] como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Tabla de características físicas de los hidrogeles sintetizados.

Tipo de Hidrogel	Características	Aspecto físico
Poliglicerol entrecruzado con ácido cítrico (HG1)	Estructura polimérica compacta y definida, con apariencia de gel, elástica, color marrón claro y esponjoso al tacto.	
Poliglicerol entrecruzado con una mezcla de ácido cítrico y ácido oleico (HG2)	Estructura sólida elástica y quebradiza, formada por pequeños gránulos de gel aglomerados de manera amorfa, color pardo y blando al tacto.	

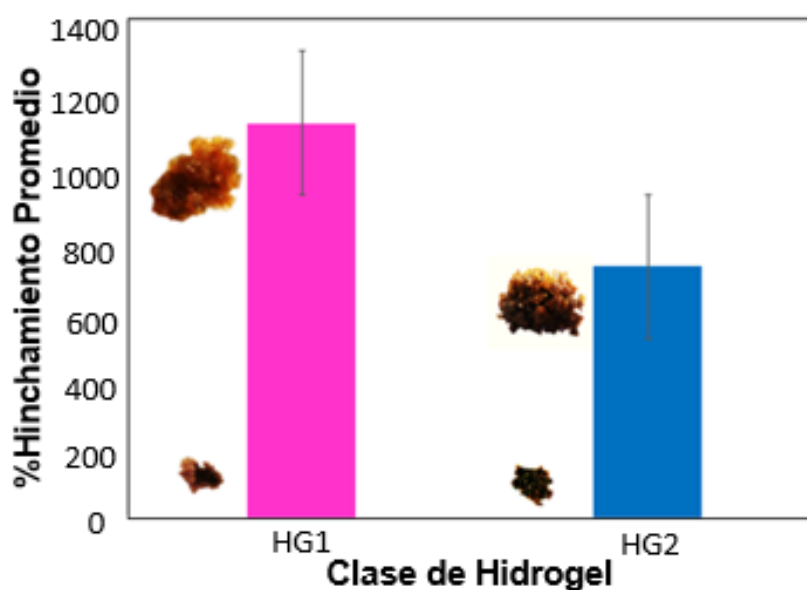
2.1.1 PRUEBAS DE ABSORCIÓN

Se realizó la prueba de hinchamiento de 24 horas, sumergiendo en agua destilada una muestra de 30 mg de xerogel de todas las muestras sintetizadas. Pasado este tiempo, el hidrogel logra retener gran cantidad de agua en su red y tiende a estabilizar su peso. Los resultados obtenidos de las pruebas de absorción se encuentran en el Anexo F.

En concordancia con los resultados, Se logró sintetizar hidrogeles de poliglicerol, entrecruzados con ácido cítricos HG1 y mezcla de ácidos (oleico y cítrico) HG2, con capacidad de hinchamiento de hasta 13 veces y 9 veces su peso respectivamente. En comparación con los hidrogeles sintetizados en estudios realizados dentro del GIP, para las mismas proporciones de reactivos empleados, se puede evidenciar una capacidad de absorción de hasta 150% mayor a la reportada por Martínez y Uribe [41], correspondiente a la síntesis de hidrogeles entrecruzados con ácido cítrico HG1. De igual manera los hidrogeles sintetizados por Bravo y Solano [42] presentaron una absorción 200% menor a la que poseen los hidrogeles de tipo HG2 con mayor absorción, sintetizados en el presente trabajo.

El resultado promedio de las pruebas de hinchamiento para las muestras de hidrogeles sintetizados, se muestran en la figura 6. Estos resultados permiten calcular el hinchamiento promedio que tendría el hidrogel en suelo al utilizarlo como aditivo en la aplicación agrícola.

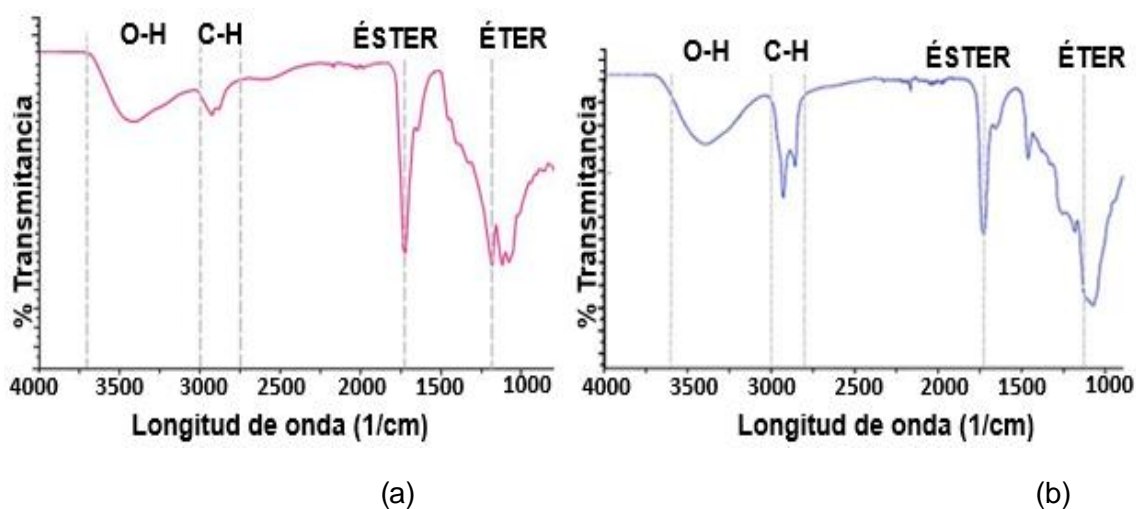
Figura 6. Resultado promedio de las pruebas de hinchamiento para el hidrogel de poliglicerol entrecruzado con ácido cítrico (HG1) y poliglicerol entrecruzado con una mezcla de ácido cítrico y oleico (HG2).



2.1.2 ESPECTROSCOPIA INFRARROJO (IR)

Se escogió una muestra de xerogel de cada tipo HG1 Y HG2, para la realización del análisis infrarrojo IR. En la figura 7, se pueden observar los grupos funcionales correspondientes de los materiales sintetizados en este trabajo.

Figura 7. Espectro IR para los tipos de xerogel. (a) Poliglicerol entrecruzado con ácido cítrico HG1. (b) Poliglicerol entrecruzado con una mezcla de ácidos cítrico y oleico (HG2).



En la figura 7.a, se observa la señal característica de la tensión del enlace OH en la región de 3000 a 3700 cm^{-1} . Las longitudes de 1000 a 1200 cm^{-1} , están relacionadas con la tensión del enlace éter y las bandas amplias correspondientes a la tensión C-H (alquilo), se evidencian en el rango de 2750 a 3000 cm^{-1} . El grupo funcional Ester, también se evidencia en el espectro en la región comprendida entre 1600 y 1800 cm^{-1} , indicando la ocurrencia de la reacción de entrecruzamiento mediante la esterificación entre los grupos carboxílicos presentes en el ácido cítrico y los grupos hidroxilos, provenientes del poliglicerol.

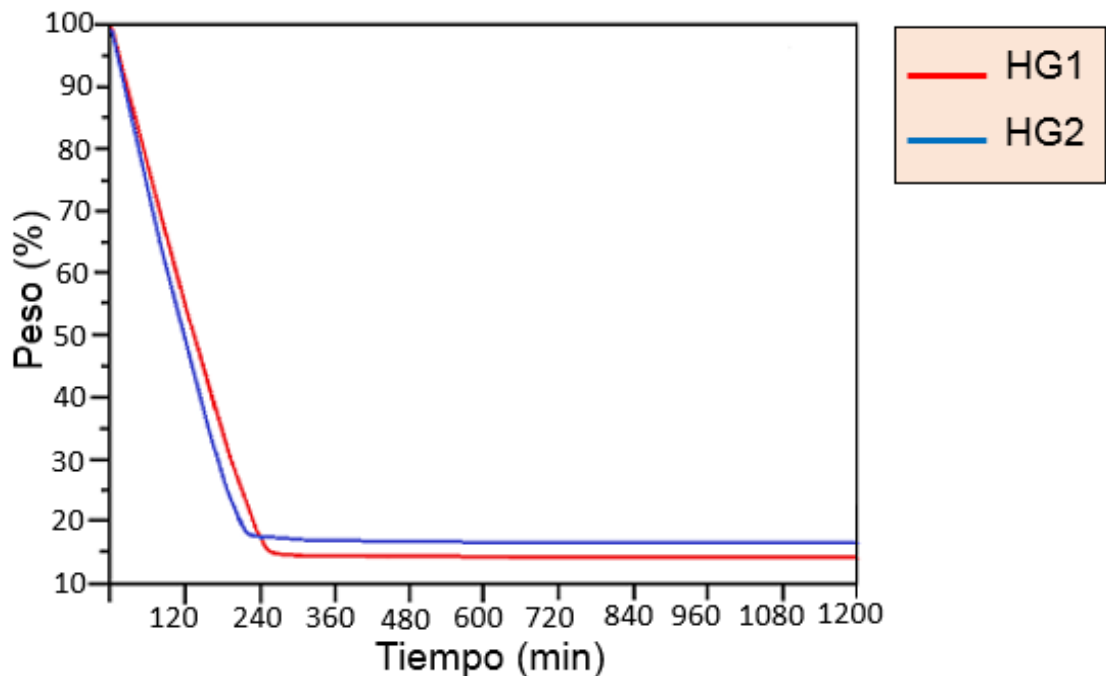
En la figura 7.b, se evidencia la presencia del grupo hidroxilo (OH) en la región del espectro comprendida entre 3600 a 3000 cm^{-1} ; ya que la reacción de polimerización del glicerol genera una gran cantidad de OH en su conformación, el grupo C-H se encuentra entre 3000 a 2800 cm^{-1} el cual hace referencia a la estructura carbonada. Debido a las reacciones de entrecruzamiento entre el poliglicerol y los ácidos (ácido cítrico y ácido oleico) los grupos hidroxilo reaccionan hacia la formación de grupos ésteres y éteres, permitiendo la aparición del grupo éster a 1724 cm^{-1} y el grupo éter en 1120 cm^{-1} longitudes de onda en el espectro IR.

En efecto las síntesis realizadas en este trabajo revelaron las bandas representativas de los grupos funcionales para cada clase de hidrogel, dentro de los rangos de longitudes de ondas establecidos en el espectro. Lo cual indica que los materiales sintetizados cumplen con las características fisicoquímicas esperadas y están en concordancia con resultados obtenidos por Uribe y Martínez [41] para HG1 y Bravo y Solano [42] para HG2.

2.1.3 PRUEBA DE DESORCIÓN

Para esta prueba, se realizó un análisis termogravimétrico (TGA) a dos muestras de hidrogel hinchado de 50mg y 48 mg para HG1 y HG2 con porcentaje de hinchamiento de 9 y 6 veces respectivamente a las condiciones explicadas en la metodología de prueba de desorción. El termograma para esta prueba se muestra en la figura 8

Figura 8. Termograma a 28 °C, de hidrogeles de poliglicerol entrecruzados con ácido cítrico (HG1) y con una mezcla de ácido cítrico y oleico (HG2).



La forma de la curva del termograma, muestra una pérdida de peso considerable de 85 % para HG1 y 82% para HG2 del peso inicial hinchado de cada muestra que corresponde a la liberación del 99% de agua retenida en ambos tipos de hidrogeles y se presentó a los 300 min en HG1 y a los 250 min en HG2 momento en que la pérdida de peso se estabiliza, quedando únicamente un 14.4% en peso de HG1 y 17.7 % en peso de HG2, que corresponde a la masa del hidrogel seco.

Se observó que las curvas de liberación de agua para los dos materiales son semejantes bajo condiciones ideales. Probablemente en condiciones reales del suelo acondicionado con hidrogel, el tiempo de liberación de agua aumenta debido a una mayor cantidad de hidrogel, y a propiedades del suelo como humedad y pH. Por tanto ambos materiales pueden ser utilizados como reservorios de agua.

2.2 EVALUACIÓN AGRÍCOLA

2.2.1 ANÁLISIS DEL SUELO

El suelo utilizado para la aplicación agrícola, es un suelo de tipo franco arcillo arenoso, y presentó una textura gruesa con predominio de arena; su composición consta de un 50% de arenas, 24% de limos y 26% de arcillas, lo cual le permite una gran aireación y si bien absorbe agua, no tiene capacidad para retenerla, por tanto tampoco conserva los nutrientes, que por lixiviado son arrastrados [26]. El pH del suelo es fuertemente ácido $\text{pH}=5.2$ [46], el contenido de materia orgánica y de Nitrógeno total son bajos. Estos resultados se obtuvieron de un análisis de caracterización y elementos menores realizados antes de comenzar la experimentación.

Al finalizar el experimento, se efectuó el mismo análisis de suelo a dos muestras pertenecientes a suelo acondicionado con hidrogel de poliglicerol entrecruzado con ácido cítrico (HG1) y Suelo acondicionado con hidrogel de poliglicerol entrecruzado con una mezcla de ácidos cítrico y oleico (HG2), Ver Anexo G.

De los resultados en los tres análisis, se observó que los valores de pH están por debajo de 5.5, presentando acidez con un valor de 5.2 para suelo testigo, 4.1 para suelo con HG2 y de 4 para suelo con HG1. En este rango de $\text{pH} < 5.5$, la disponibilidad de todos los nutrientes (N, P, K, Mg, Ca, Na, Zn, Cu, B, Fe, Al y Mn) que aporta el suelo a la planta comienza a verse limitada por el pH, considerada como una variable altamente influyente en los procesos químicos que ocurren en el suelo [46]. La diferencia entre los valores de pH entre el suelo testigo y los suelos con hidrogel, se debe a la naturaleza ácida de los hidrogeles empleados en este estudio. Sin embargo se obtuvo resultados favorables en suelo acondicionado con el hidrogel HG2 probablemente esto se debe a que las plántulas de frijol son tolerantes a rangos de pH ácido en el suelo, pero no al déficit hídrico, por tanto se evidencia que el hidrogel constituye una reserva de agua adicional para el sistema suelo-planta.

2.2.1.1 Pruebas de retención de agua del suelo. Para esta prueba, se tomaron tres muestras de suelo de igual peso, a dos de ellas se les adicionó hidrogeles al 1% en peso seco respecto al suelo, de acuerdo con los niveles de experimentación. Estas muestras de suelo se saturaron con agua del grifo y se dejaron drenar, hasta que su peso fue constante. Luego se introdujeron en el horno a 105 °C por 24 horas. Los resultados se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Resultados pruebas de retención de agua en el suelo en los tres niveles de experimentación.

Tipo de Muestra	Peso inicial (g)	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	% Retención
Suelo (testigo)	60.3186	73.1974	48.7801	50.0558
Suelo con HG1	60.9138	75.1352	49.1238	52.9507
Suelo con HG2	60.9166	77.4134	49.1634	57.5212

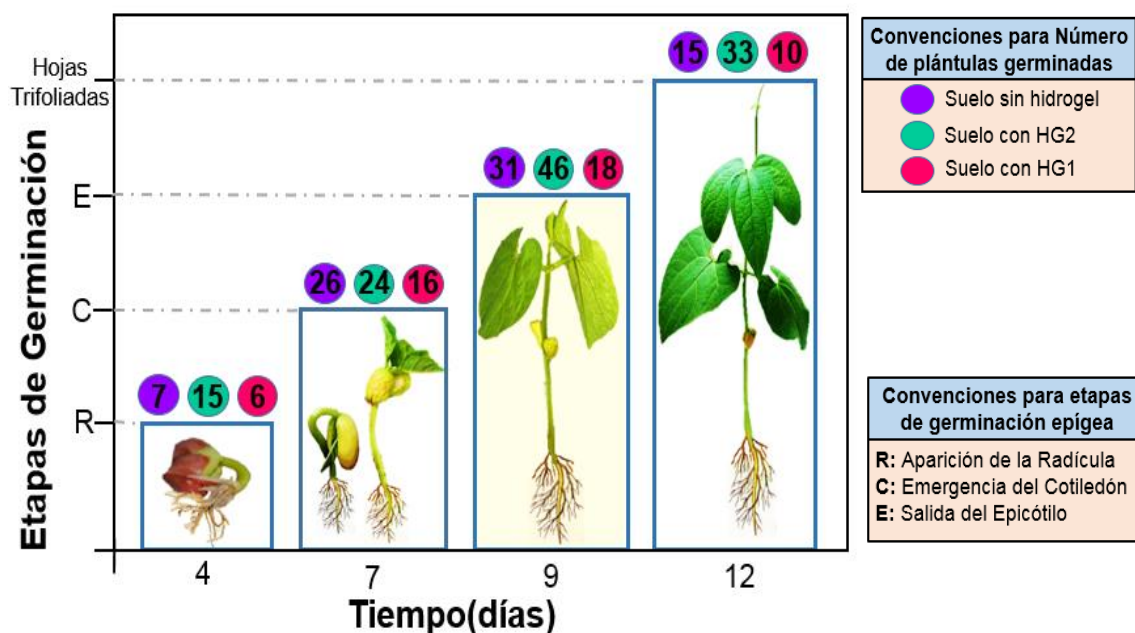
En la anterior tabla se observa que la retención de agua en el suelo para el testigo es de 50%, la cual es baja en comparación con otros tipos de suelos que retienen hasta el doble de esta cantidad [46]. En efecto con la adición de hidrogeles permite un aumento en la retención del 2.8% para suelo con HG1 y del 7.5% para suelo con HG2, respecto a la retención del suelo sin hidrogel (testigo).

De los resultados se infiere que la retención de agua en el suelo con hidrogel HG2, sintetizado con ácido cítrico y ácido oleico como agentes entrecruzantes, fue mayor que en las demás condiciones, a pesar de que en las pruebas de absorción presentara un menor porcentaje de hinchamiento con respecto al hidrogel HG1, entrecruzado únicamente con ácido cítrico. Esto puede deberse a la baja capacidad de retención de agua que posee el suelo, y por ende, el tiempo de contacto que le brinda al hidrogel HG1, es insuficiente para que este absorba la cantidad de agua necesaria para llenar su red.

2.2.2 EFECTO DE LOS HIDROGELES EN LA GERMINACIÓN DE SEMILLAS DE FRÍJOL.

De acuerdo con el diseño experimental, de una variable a tres niveles: suelo sin hidrogel (nivel 1), suelo con HG2 (nivel 2) y suelo con HG1 (nivel 3); se llevó a cabo la siembra de las 300 semillas de frijol. Diariamente se registró la etapa de la germinación epigea en la que se encontraba cada plántula utilizando las convenciones explicadas en la metodología. Los datos de germinación se tomaron hasta el día 12 debido a que todas de las semillas que germinaron tuvieron su desarrollo como plántulas hasta ese día, de ahí en adelante, evolucionaron a plantas (Anexo J). Los resultados se muestran en la figura 9.

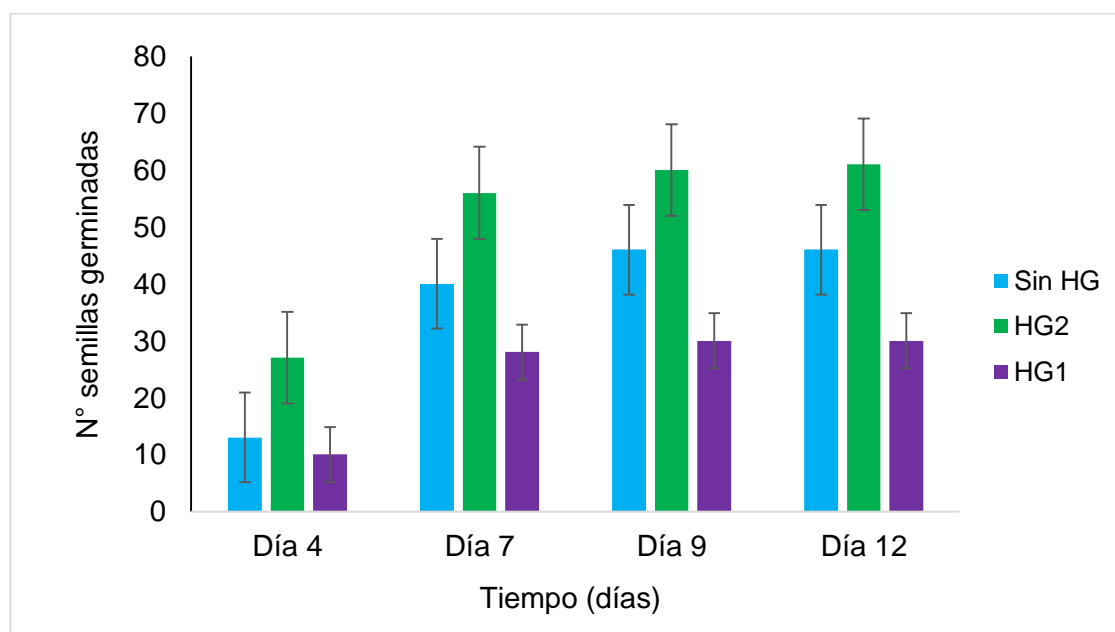
Figura 9. Número de plántulas germinadas en cada nivel de experimentación, según las etapas de germinación epigea a diferentes días.



De la figura 10, se evidencia que la presencia del hidrogel HG2 aumenta la tasa de germinación, debido a que presentó el mayor número de semillas en etapa radicular (R) en el día 4, a su vez excede en un 48% a la condición testigo (suelo sin hidrogel) respecto al número de plántulas en etapa de epicótilo (E) en el día 9. En cuanto a número de plantas que presentaron hojas trifoliadas (día 12), se

logró un aumento de 100% respecto al testigo en el suelo acondicionado con HG2 lo que indica un mayor desarrollo biológico en plantas sembradas en esta condición.

Figura 10. Número de semillas germinadas en total, en diferentes días para los niveles de experimentación: suelo sin hidrogel, suelo con HG2 y suelo con HG1.



Para la tasa de germinación de semillas, se realizó el conteo de las mismas para cada nivel en los días definidos. Cabe resaltar que el suelo donde se realizó la siembra carece de las condiciones óptimas para el cultivo y por tanto no fue totalmente viable para la germinación del 100% de las semillas en la experimentación como se muestra en la figura 10.

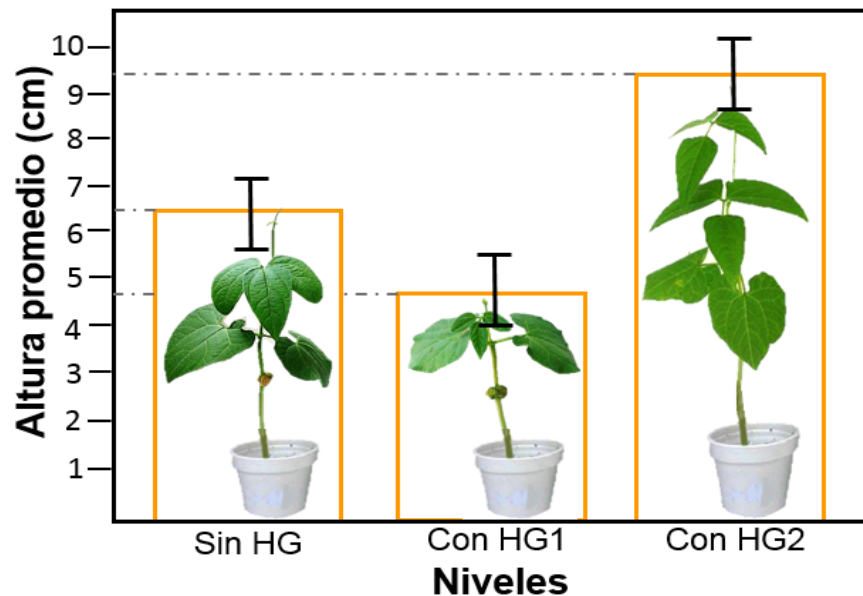
De la figura 10 se aprecia que en todos los niveles hubo germinación, y se alcanzó la mayor tasa en 46 %, 61% y 30% para suelo sin hidrogel, suelo con poliglicerol entrecruzado con una mezcla de ácido cítrico y oleico (HG2) y poliglicerol entrecruzado con ácido cítrico (HG1) respectivamente, notándose la

más alta para el suelo con HG2. Esto concuerda con los resultados obtenidos en las pruebas de retención de agua, donde se evidenció una mayor retención en suelo acondicionado con hidrogel HG2, logrando un aumento en las reservas hídricas del suelo, y posiblemente permite que la germinación sea más alta. Comparando con otros estudios donde utilizan diferentes clases de hidrogeles como acondicionadores de suelos, en cultivos donde se logra un aumento de la germinación de 50% en semillas de tomate [30] y 33 % en garbanzos [35], se puede inferir que los resultados mostrados en este estudio fueron significativos. Para el suelo con HG1, se obtuvo un bajo rendimiento en cuanto a la germinación, posiblemente el alto contenido de ácido cítrico usado en la síntesis como agente entrecruzante, puede causar leves quemaduras en las semillas y en última instancia evitar que germinen [47]. La segunda posible explicación es que al poseer un porcentaje de absorción alto, los gránulos de hidrogel mezclados en el suelo, se hinchan incrementando así la porosidad del suelo, lo que favorece la aireación. A su vez la aireación aumenta la evaporación del contenido de agua presente en el suelo utilizado en este estudio [35] el cual, presenta una baja capacidad de retención de agua debido a su textura franco arcillo arenosa [24].

2.2.3 EFECTO DE LOS HIDROGELES SOBRE EL CRECIMIENTO DE LAS PLÁNTULAS DE FRÍJOL.

Se realizó un seguimiento diario de altura de plántulas de frijol en centímetros (cm), hasta el día 12 después de la siembra, con el fin de cuantificar el crecimiento que alcanzaron en todos los tratamientos de la siembra. A partir del día 12, la mayoría de las plántulas sufrieron su transformación a plantas. La germinación de semillas y desarrollo de plántulas fueron etapas críticas en el crecimiento inicial, desde los primeros días de siembra la longitud de las semillas germinadas se hizo evidente (Anexo J). En la figura 11, se muestra el promedio de los datos de crecimiento en cada nivel de experimentación.

Figura 11. Altura promedio alcanzada por las plántulas en los niveles de experimentación: suelo sin hidrogel, suelo con HG2 y suelo con HG1.

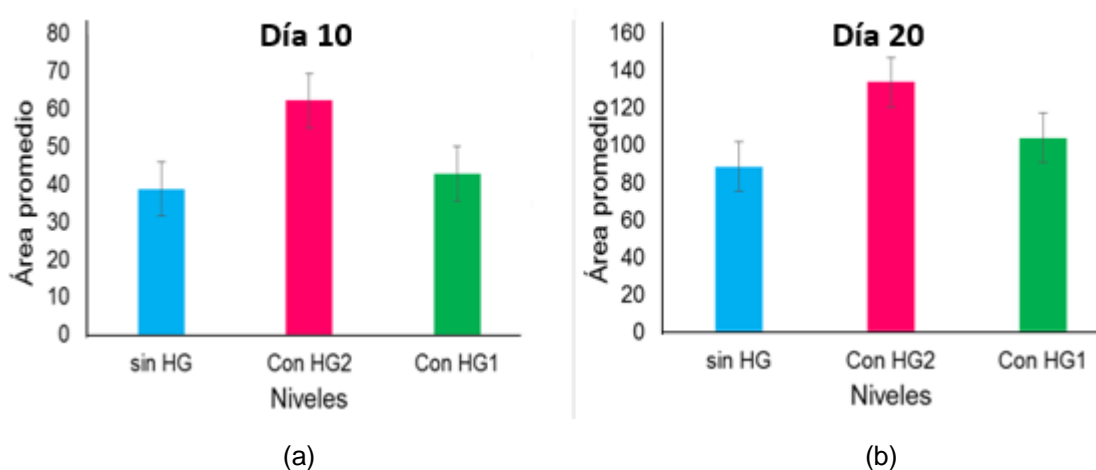


Los datos obtenidos se sometieron a un análisis ANOVA con los valores de crecimiento de cada plántula en cada nivel sobre el único factor (tipo de hidrogel) ver Anexo H. Los resultados arrojaron un valor $p=0.0002$, lo que indica que el factor a estudiar en este caso la presencia de hidrogel, es una variable muy significativa sobre el crecimiento de las plántulas, dado que la probabilidad de que los datos se deban al azar es muy baja con un 0.02%.

De la figura 11, se evidencia que la adición de hidrogel al suelo fue significativa. Además se presentó una mayor influencia de HG2 sobre los demás niveles con un aumento del 50% en el crecimiento de plántulas respecto al suelo sin hidrogel y del 96% respecto al suelo con HG1. Comparando lo anterior con otros estudios donde también se presentaron aumentos en el crecimiento de plantas sembradas en suelos acondicionados con otros tipos de hidrogeles, que lograron un aumento del 23% en cultivos de garbanzo [35] y de 38 % para cultivos tomate [30]; se evidencia que el acondicionamiento de suelos con hidrogel HG2 evaluado en este estudio tiene un efecto muy significativo sobre el crecimiento de plantas.

2.2.3.1 Cuantificación del desarrollo de plantas mediante el área foliar. Para el área foliar, se tomaron fotografías de las hojas de las 10 plántulas de cada nivel que presentaron el mejor desarrollo biológico en los días 10 y 20 de la siembra. Las plantas fueron elegidas mediante la observación de la altura, tamaño y número de hojas, posteriormente se calculó el área foliar haciendo uso del software ImageJ. Los resultados del área foliar promedio de las plántulas para cada nivel, se muestran en la figura 12. De igual modo se realizó el conteo diario del número de hojas de cada plántula (ver anexo I).

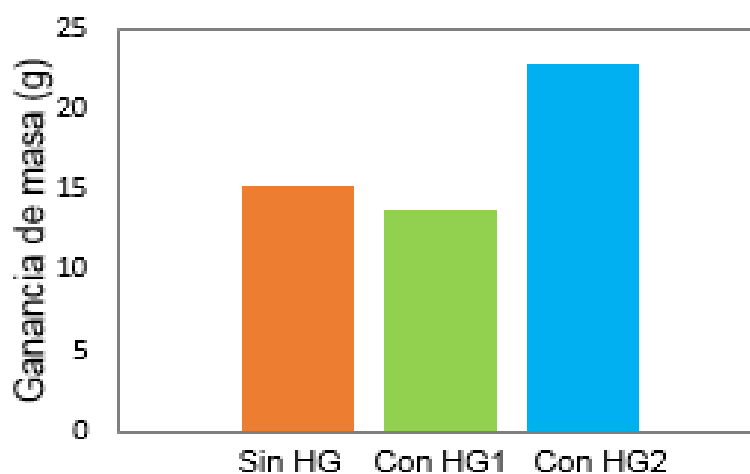
Figura 12. Área foliar promedio de plántulas en los niveles de experimentación. (a) en el día 10 después de la siembra. (b) al término de la experimentación en el día 20.



Los resultados de la figura 12, reflejan que las plantas sembradas en suelo acondicionado con HG2 presentaron un valor de área foliar promedio más alto que las demás plantas sembradas en los demás niveles, alcanzando para el día 10 un aumento del 60% (figura 13.a) y del 50% para el día 20 (figura 13.b), respecto al suelo sin hidrogel. Las plantas sembradas en suelo con HG1 obtuvieron un incremento en su área foliar de tan solo 10% para el día 10 (figura 13.a) y 17% para el día 20, respecto a las plantas testigo (figura 13.b). Cabe resaltar que uno de los procesos fisiológicos más sensibles al déficit hídrico en el frijol es el desarrollo foliar, ya que su efecto reduce el área foliar y acelera la marchitez de las hojas maduras [48].

2.2.3.2 Ganancia de masa de las plantas. Al término de la experimentación en el día 20, se tomaron las 5 plantas con mejor desarrollo de cada nivel de experimentación, y se siguió el protocolo explicado en la metodología para ganancia de masa. Los resultados se muestran en la figura 13.

Figura 13. Ganancia de masa de las plantas en los niveles de experimentación.



De los resultados, se infiere que la mayor ganancia de peso real se obtuvo en plantas sembradas en suelo acondicionado con el hidrogel de poliglicerol entrecruzado con una mezcla de ácidos cítrico y oleico (HG2), excediendo en un 46.6% al valor de ganancia de las plantas sembradas en el suelo sin HG (testigo). Comparando lo anterior con otro estudio donde utilizan hidrogeles de acrilamida, que lograron un aumento del 55 % en la ganancia en plantas de garbanzo [35], se evidencia que el acondicionamiento de suelos con hidrogeles, genera un incremento en el tamaño y masa de las plántulas, favoreciendo el desarrollo biológico de las especies cultivadas, aumentando la productividad del suelo.

3. CONCLUSIONES

Polímeros con alta capacidad de absorción se lograron sintetizar a partir de glicerol, por medio de reacciones de polimerización y de esterificación del poliglicerol, utilizando ácido cítrico y una mezcla de ácido cítrico y ácido oleico como agentes entrecruzantes. Se comprueba con la caracterización, que los materiales obtenidos poseen los grupos funcionales propios de una estructura hidrofílica, con capacidades de absorción de 9 y 13 veces su peso para los hidrogeles sintetizados.

El efecto de incorporar hidrogeles al suelo sobre la respuesta de germinación y crecimiento de plántulas de frijol, resultó favorable únicamente para el suelo acondicionado con hidrogel HG2. Con la mezcla del hidrogel HG2 y suelo de textura franco arcillo arenosa, se logró un mayor aprovechamiento del agua de riego, al perderse una menor cantidad de agua por filtración, lo que aumenta las reservas hídricas del suelo. Estos factores fueron suficientes para mejorar el desarrollo biológico de las plantas. Sin embargo, se presentó una disminución en el pH del suelo, lo que indica que el hidrogel aporta acidez; por tanto es necesario mejorar su estructura para que pueda emplearse como aditivo agrícola.

4. RECOMENDACIONES

- Estudiar una manera de retirar el catalizador homogéneo, de los hidrogeles sintetizados, Por ejemplo mediante la utilización de resinas de intercambio iónico para ampliar su campo de aplicación.
- Realizar en estudios posteriores un análisis de tejido vegetal para conocer si la naturaleza ácida del hidrogel afecta o no la composición química de las plantas a la hora de usarlo como aditivo agrícola.
- Mejorar las condiciones del suelo agregando materia orgánica o turba para que la retención del mismo sea mayor y a su vez le brinde al hidrogel la posibilidad de absorber más agua en tierra.
- Realizar un análisis termogravimétrico (TGA), en las mismas condiciones en que se realizó en este estudio pero agregando una atmosfera con cierto porcentaje de humedad para asemejarlo al ambiente húmedo del suelo.
- Explorar la aplicación de los hidrogeles sintetizados en otros tipos de suelo con pH básicos para evaluar su efecto sobre el sistema suelo-hidrogel-planta.
- Realizar estudios sobre la biodegradabilidad de los hidrogeles sintetizados, con el fin de conocer si el material una vez terminada su función como reservorio de agua, puede servir como abono en el suelo.

CITAS BIBLIOGRAFICAS

[1] SALEHPOUR, Somaieh; ZULIANI, Christopher J. y DUBE Marc A. Synthesis of novel stimuli-responsive polyglycerol-based hydrogels. En: European Journal of Lipid Science and Technology. 2012, p. 92-99.

[2] H.W, Tan; A.R. Abdul Aziz. y M.K Aroua. Glycerol production and its applications as a raw material: A review. En: Renewable and sustainable Energy Reviews, 2013, Vol. 27, p. 118–127.

[3] D.T, Johnson; K.A. Taconi. The glycerin glut: Options for the value-added conversion of crude glycerol resulting from biodiesel production. En: Environ. Prog. 2007, p. 338–348.

[4] M, Pagliaro, *et al.* From glycerol to value-added products. En: Angew. Chem. Int. Ed. 2007, p. 4434–4440.

[5] SALEHPOUR, Somaieh y DUBE, Marc A. Towards the Sustainable Production of Higher-Molecular-Weight Polyglycerol. En: Polyglycerol. Macromolecular Chemistry and Physics, 2011, vol. 212, No. 12, p. 1284-1293.

[6] W, Shi; M. J, Dumont y E.B Ly. Synthesis and properties of canola protein-based superabsorbent hydrogels. En: European Polymer Journal. 2014, Vol.5.4, p. 172–180.

[7] ROJAS, Blanca, *et al.* Estudio de la germinación de semillas de tomate en suelos áridos extraídos de la Península de Araya (Venezuela) al utilizar

polímeros de tipo hidrogeles, En: Revista Iberoamericana de Polímeros. 2004. p.17-27.

[8] SINGH, Anisha, *et al.* Hydrogels: a review. 2010, vol. 4, No. 2.

[9] AMULYA, k Saxena. Synthetic biodegradable hydrogel (Pleura Seal) sealant for sealing of lung tissue after thoracoscopic resection. En: J Thoracic Cardiovasc Surg, 2010, Vol.139, No.2, p. 496–497.

[10] HAMIDI, Mehrdad, *et al.* Hydrogel nanoparticles in drug delivery. En: Adv Drug Deliv Rev, 2009, Vol.60, No.15, p. 1638–1649.

[11] XU, Sun, *et al.* Preparation and characterization of water-swellaable natural rubbers. En: J Appl Polym Sci, 2002, Vol.86, p. 3212–3717.

[12] Chen, X, *et al.* Enzymatic and chemoenzymatic approaches to synthesis of sugar based polymer and hydrogels.En: Carbohydr Polym.1995, Vol.2, p.15-21.

[13] N. Kashyap, N. Kumar, y M. Kumar. Hydrogels for pharmaceutical and biomedical applications. En: Crit Rev Ther Drug Carr Syst, 2005, Vol. p. 107–149.

[14]. KAIHARA, Sachiko; MATSUMURA, Shuic y FISHER, John.P. Synthesis and characterization of cyclic acetal based degradable hydrogels. En: Eur J Pharm Biopharm, 2008, vol.68, No. 1, p. 67–73.

[15] STAMATIALIS, Dimitrios, *et al.* Medical applications of membranes: drug delivery, artificial organs and tissue engineering. En: J Membr Sci, 2008, vol.308, No.1-2, p. 1–34.

[16] ZHANG, Ling, *et al.* Preparation of collagen–chondroitin sulfate–hyaluronic acid hybrid hydrogel scaffolds and cell compatibility in vitro. En: Carbohydr Polym, 2011, vol.84, No.1, p. 118–125.

[17] M, Saul Justin y F, Williams David. Hydrogels in regenerative medicine, principles of regenerative medicine. 2nd ed. 2011, p. 637–61.

[18] H.J. Van der Linden, *et al.* Patterned dual pH responsive core shell hydrogels with controllable swelling kinetics and volume. Analyst, 2003, vol.12, p. 325–331.

[19] SIKAREEPAISAN, Panprung; RUKTANONCHAI, Uracha y SUPAPHOL, Pitt. Preparation and characterization of asiaticoside-loaded alginate films and their potential for use as effectual wound dressings. En: Carbohydr Polym, 2011, vol. 83, No. 4, p.1457–1469.

[20] KRSKO, Peter, *et al.* Length-scale mediated adhesion and directed growth of neural cells by surface-patterned poly (ethylene glycol) hydrogels. En: Biomaterials, 2009, vol. 30, No. 5, p. 721–729.

[21] M. Enas Ahmed. Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review. En: Journal of Advanced Research. 2015, vol. 6, p. 105–121.

[22] KRSKO, Peter, *et al.* Length-scale mediated adhesion and directed growth of neural cells by surface-patterned poly(ethylene glycol) hydrogels. En: Biomaterials, 2009, vol. 30, No. 5, p. 721–729.

[23] M. Ben-Hur y R. Keren. Polymer effects on water infiltration and soil aggregation, En: Soil Science Society of America Journal, 1997, vol. 61, p.565-570.

[24] FERNANDEZ, Jesús. El Recurso suelo-agua en medios áridos y semiáridos. En: Monográfica, Biblioteca de Ciencias Experimentales y Exactas. Editorial Universidad de Granada (España), p. 190.

[25] GOMEZ, Carlos, *et al.* Análisis de la situación hidrogeológica de la Mesa de los santos departamento de Santander. Trabajo de grado para obtener el título de especialista en Recursos Hídricos. Bogota, Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingenierías. Programa de Especialización en Recursos Hídricos.2014.

[26] R, Azzam. Polymeric conditioner gels for desert soils. En: Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1983, vol. 14, p. 739–760.

[27] ESTRADA Rodolfo. Hidrogeles biopoliméricos potencialmente aplicables en agricultura. En: Revista iberoamericana de polímeros, 2010, vol.12, p.76-87.

[28] K, Kazanskii y S, Dubroskii. Chemistry and physics of agricultural hidrogels. En: Adv. Sci. Polym., 1992, vol. 104, p 97-133.

[29] CHÁVEZ, M, *et al.* Temas de enzimología. Tomo 2. Facultad de Biología. Universidad de la Habana, 1990, 84 p.

[30] ROJAS, Blanca, *et al.* Los hidrogeles poliméricos como potenciales reservorios de agua y su aplicación en la germinación de semillas de tomate en diferentes tipos de suelos. En: Revista Iberoamericana de Polímeros, 2006, vol 7, No. 3, p 1999-210.

[31] H., Andry, *et al.* Water retention, hydraulic conductivity of hydrophilic polymers in sandy soil as affected by temperature and water quality. En: Journal of Hydrology, 2009, vol. 373, p.177–183.

[32] F. L., Buchholz y A.T., Graham. Modern superabsorbent polymer technology, En: Wiley-VCH, 1998.

[33] F. L. Buchholz, “Superabsorbent polymers: science and technology,” in Proceedings of the ACS Symposium Series 573, F. L. Buchholz and N. A. Peppas, Eds., En: American Chemical Society, Washington, DC, USA, 1994, p. 27–38.

[34] BARÓN, Andrés, *et al.* Evaluación de hidrogeles para aplicaciones agroforestales. En: Revista en ingeniería de investigación, 2007, vol.27, No. 3, p. 35-44.

[35] J. Akhter, *et al.* Effects of hydrogel amendment on water storage of sandy loam and loam soils and seedling growth of barley, wheat and chickpea. En: PLANT SOIL ENVIRON, 2004 Vol. 50, No. 10, p 463–469.

[36] D.S. Thomas. Hydrogel applied to the root plug of subtropical eucalypt seedlings halves transplant death following planting. En: Forest Ecology and Management, 2008, vol. 255, p.1305–1314.

[37] HÜTTERMANN, Aloys; ZOMMORODI, Moitaba; REISE, Kim. Addition of hydrogels to soil for prolonging the survival of *Pinus halepensis* seedlings subjected to drought. En: Soil and Tillage Research, 1999, Vol 50, p. 295–304.

[38] ROZO, Gladys, *et.al.* Adición de hidrogeles al suelo para la germinación y cultivo de Lactuca Sativa Variedad Green Forest. Facultad de ciencias naturales, Universidad Jorge Tadeo Lozano. Vol 2, No. 5, 20p. ISBN 20270291.

[39] TORRES, Duilio, *et al.* Efectos de un acondicionador sintético (Terracottem) y un acondicionador orgánico (Bocaschi) sobre la eficiencia del uso de agua en el cultivo del pimentón. En: Agronomía Trop., Maracay, 2008, vol. 58, No. 3, P.277-287.

[40] XU, Shengtao, *et al.* Effect of synthetic and natural water absorbing soil amendment soil physical properties under potato production in a semi-arid region. En: Soil & Tillage Research, 2015, vol. 148, p. 31–39.

[41] MARTÍNEZ, Anyelo y URIBE, Dora. Síntesis y caracterización de un hidrogel a partir de glicerol con ácido cítrico como agente entrecruzante. Tesis Pregrado Ingeniero Químico. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico químicas. Escuela de Ingeniería Química. 2014.

[42] BRAVO, Cesar y SOLANO, Leidy. Síntesis y caracterización de hidrogeles de poliglicerol utilizando una mezcla de ácido cítrico y ácido oleico como agentes entrecruzantes. Tesis pregrado Ingeniero Químico. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. 2014.

[43] RINCÓN, Natalia; OLARTE, Manuel, y PÉREZ, Juan. Determinación del Área Foliar en Fotografías Tomadas con una Cámara Web, un Teléfono Celular o una Cámara Semiprofesional. En: Rev. Fac. Nal. Agr. Medellín, 2012, vol. 65 No. 1, p. 6399-6405.

[44] GONZALES MURILLO, Carlos, A. Contenido de Humedad del Agua en el Suelo. R.A.S.P.A. Universidad Nacional de Colombia. [En línea]. Disponible en: http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ingenieria/raspa/und_2/pdf/und2.pdf [citado el 8 de abril de 2015].

[45] CHIRINOS, Dorys, *et al* .Desarrollo de la planta de tomate *Lycopersicon esculentum*, Miller, cv Rio Grande, Venezuela. Altura de planta, peso fresco, peso seco, número de ramificaciones, hojas, flores y frutos. En: Rev. Fac. Agron., 1993, vol. 10, No. 3, p. 311-324.

[46] JARAMILLO, Daniel F. Introducción a la ciencia del suelo. Facultad de ciencias. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, 2002, 591p.

[47] TROITSKAIA, Alice. The Efect of acids and bases on plant growth. University of Alberta. 2003, vol 2, No. 7, p.1-7.

[48] ACOSTA, D Efraín, *et al*. Relación entre índice de área foliar y rendimiento en frijol bajo condiciones de secano. En: Agric. Téc. Méx, vol. 34, No. 1, 2008, p. 13-20.

BIBLIOGRAFÍA

BRAVO, Cesar y SOLANO, Leidy. Síntesis y caracterización de hidrogeles de poliglicerol utilizando una mezcla de ácido cítrico y ácido oleico como agentes entrecruzantes. Tesis pregrado Ingeniero Químico. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. 2014.

CHIRINOS, Dorys, *et al* .Desarrollo de la planta de tomate *Lycopersicon esculentum*, Miller, cv Rio Grande, Venezuela. Altura de planta, peso fresco, peso seco, número de ramificaciones, hojas, flores y frutos. En: Rev. Fac. Agron., 1993, vol. 10, No. 3, p. 311-324.

JARAMILLO, Daniel F. Introducción a la ciencia del suelo. Facultad de ciencias. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, 2002, 591p.

J. Akhter, *et al*. Effects of hydrogel amendment on water storage of sandy loam and loam soils and seedling growth of barley, wheat and chickpea. En: PLANT SOIL ENVIRON, 2004 Vol. 50, No. 10, p 463–469.

MARTÍNEZ, Anyelo y URIBE, Dora. Síntesis y caracterización de un hidrogel a partir de glicerol con ácido cítrico como agente entrecruzante. Tesis Pregrado Ingeniero Químico. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico químicas. Escuela de Ingeniería Química. 2014.

ROJAS, Blanca, *et al*. Los hidrogeles poliméricos como potenciales reservorios de agua y su aplicación en la germinación de semillas de tomate en diferentes tipos de suelos. En: Revista Iberoamericana de Polímeros, 2006, vol 7, No. 3, p 1999-210.

ANEXOS

ANEXO A. Protocolo para la síntesis de hidrogel (HG1)

La obtención del hidrogel (HG1), se realiza a partir de la polimerización por etapas del glicerol seco, y su posterior esterificación con ácido cítrico como agente entrecruzante.

POLIMERIZACIÓN

A continuación se muestran en la tabla A1 las condiciones para la polimerización del glicerol

Tabla A1. Condiciones de polimerización del glicerol.

Condiciones de reacción	
Glicerol seco	10 ml
Catalizador (H ₂ SO ₄)	0,32 ml
Temperatura	160 °C
Tiempo de polimerización	13 min
Presión de vacío	22 in Hg

El protocolo a realizar, consta de los siguientes pasos:

1. Se sumerge el reactor en un baño de aceite de silicona y se adiciona el glicerol seco medido previamente (10 ml).
2. Se Calienta el reactor hasta una temperatura de 160°C. Dentro del reactor se burbujea nitrógeno tanto para mantener un ambiente inerte como para un contacto mayor entre los reactivos; y con la bomba se genera una presión de vacío de 22 in Hg.
3. Cuando se alcanza la temperatura de reacción 160°C, Se inyecta ácido sulfúrico como catalizador a 4,8%p/p (0,32ml) para polimerizar.

4. El tiempo de reacción se estableció en 10 minutos momento en que el polímero obtenido tenga la fluidez necesaria para reaccionar con la mezcla de los dos ácidos como agentes entrecruzantes, de lo contrario llegará al punto de gel antes de poderlo entrecruzar.

ENTRECRUZAMIENTO DEL POLIGLICEROL CON ÁCIDO CÍTRICO

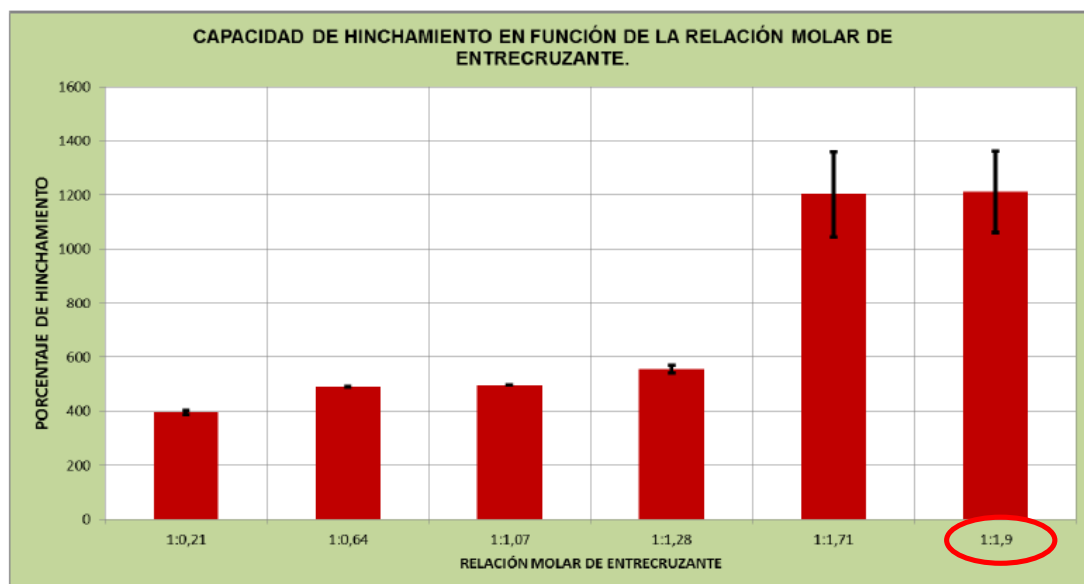
Basados en los datos experimentales de la tesis reportada por el GIP [38]; Para el entrecruzamiento del poliglicerol se utilizó ácido cítrico de acuerdo a la relación molar que presento mayor porcentaje de absorción en las síntesis realizadas. Las relaciones molares usadas en la experimentación de la tesis referenciada, se presentan en la Tabla A2.

Tabla A2. Cantidad de ácido cítrico usado en las distintas relaciones molares entre el glicerol y el ácido cítrico [38].

Relación Molar	# Moles PG	# Moles AC	Ácido Cítrico
1: 0,21	0,0545	0,011709	0,7499
1: 0,64	0,0545	0,03512	2,2497
1: 1,07	0,0545	0,05855	3,746
1: 1,28	0,0545	0,07025	4,49
1: 1,71	0,0545	0,093678	5,99
1: 1,9	0,0545	0,105389	6,749

Los resultados de las pruebas de hinchamiento a 24 horas de las muestras, para las relaciones molares de la tabla 2, se muestran en la figura 1.

Figura A1. Gráfica de la capacidad de hinchamiento en función de la relación de entrecruzante a 24 horas.



De acuerdo con los resultados mostrados en la gráfica, se observa que la relación molar para hidrogel con la que se obtuvo mayor porcentaje de absorción en la prueba fue (PG1: AC1.19), por ende se toma como base para realizar el tipo de hidrogel denominado como HG1 en la realización del presente trabajo de grado.

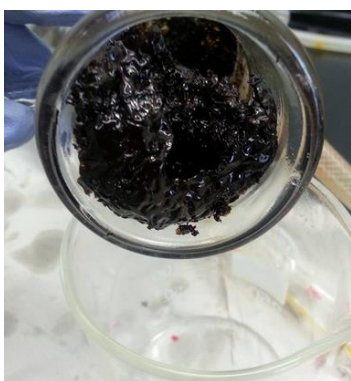
El siguiente es el protocolo para llevar a cabo la esterificación del poliglicerol y sus condiciones de reacción (tabla 3):

Tabla A3. Condiciones para la esterificación del poliglicerol con ácido cítrico.

Condiciones de reacción	
Ácido cítrico	6.749 g
Temperatura	160 °C
Tiempo de entrecruzamiento (AC)	10 min
Tiempo de esterificación	5 min

1. Una vez transcurrido el tiempo de polimerización, se apaga la bomba y se cierra la válvula de nitrógeno. En este punto se agrega el ácido cítrico pulverizado y previamente pesado en la cantidad mostrada en la tabla A3.
2. Se enciende la bomba y se abre la válvula de flujo de nitrógeno.
3. Se espera a que transcurra el tiempo de entrecruzamiento (5 minutos aproximadamente).
4. La reacción finaliza cuando se observa que el material alcanza el punto de gel. Se apaga la bomba y se cierra la válvula de flujo de nitrógeno. Se desmolda el Poliglicerol Éster en un recipiente de vidrio [38].

. **Figura A2.** a) Poliglicerol éster finalizada la reacción. b) Hidrogel desmoldado en un recipiente de vidrio. c) Hidrogel hinchado en agua destilada



a)



(b)



(c)

ANEXO B. Protocolo para la síntesis del hidrogel (HG2)

El siguiente es el protocolo para la obtención del hidrogel (HG2) a partir de la polimerización por etapas del glicerol, y posterior esterificación con una mezcla de ácido cítrico y ácido oleico.

POLIMERIZACIÓN

Tabla B1. Condiciones de reacción para la polimerización de glicerol seco.

Condiciones de reacción	
Glicerol seco	10 ml
Catalizador (H ₂ SO ₄)	0,32 ml
Temperatura	160 °C
Tiempo de polimerización	10 min
Presión de vacío	22 in Hg

El protocolo de polimerización se siguió de la misma manera que para el hidrogel HG1 explicado en el anexo A.

ENTRECRUZAMIENTO DEL POLIGLICEROL CON LA MEZCLA DE ÁCIDOS.

Basados en los datos experimentales de la tesis reportada por el GIP [39], para el entrecruzamiento del poliglicerol se utilizó una mezcla de ácido cítrico y ácido oleico, de acuerdo a la relación molar que presento mayor porcentaje de absorción de las síntesis realizadas. Las relaciones molares de la experimentación se presentan en la Tabla B2.

Tabla B2. Diseño de experimentos de las 15 muestras a sintetizar. Cantidad de ácido oleico y ácido cítrico para cada relación. [39]

Mezcla de ácidos (% mol)	Relación molar OH:COOH (PG:AE)				
	1:2	1:1,5	1:1	1:0,5	1:0,05
90% AC 10% AO	4,35 [g AC] 2,37 [ml AO]	3,26 [g AC] 1,78 [ml AO]	2,17 [g AC] 1,18 [ml AO]	1,08 [g AC] 0,59 [ml AO]	0,109 [g AC] 0,06 [ml AO]
70% AC 30%AO	3,38 [g AC] 7,14 [ml AO]	2,53 [g AC] 5,35 [ml AO]	1,69 [g AC] 3,57 [ml AO]	0,84 [g AC] 1,78 [ml AO]	0,084 [g AC] 0,18 [ml AO]
50%AC 50%AO	2,41 [g AC] 11,89 [ml AO]	1,81 [g AC] 8,92 [ml AO]	1,21 [g AC] 5,95 [ml AO]	0,60 [g AC] 2,97 [ml AO]	0,060 [g AC] 0,29 [ml AO]

Figura B1. Prueba de hinchamiento cada cinco minutos para las 10 muestras sintetizadas

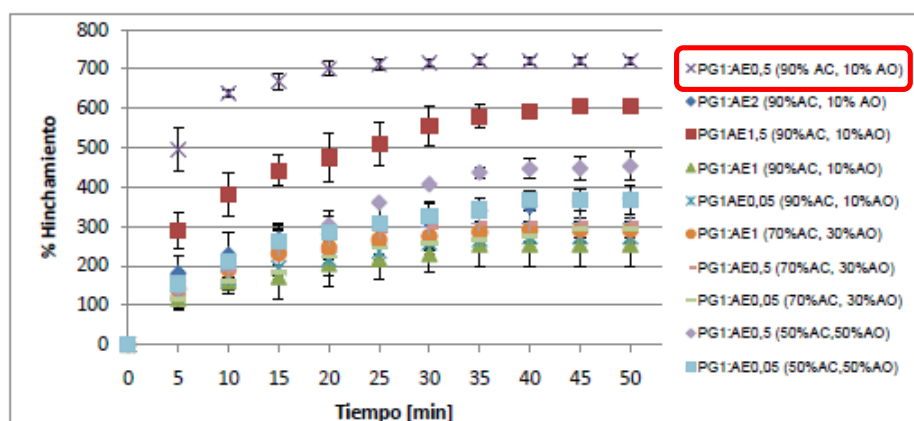
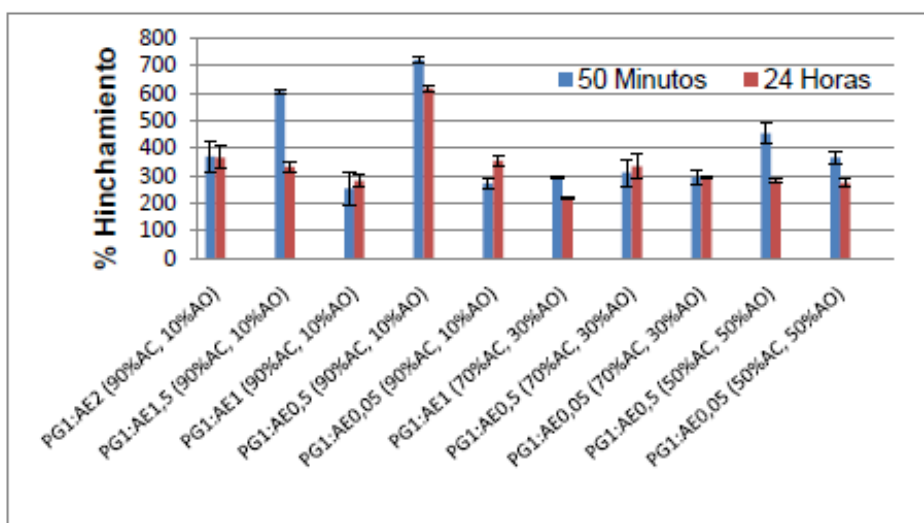


Figura B2. Comparación del hinchamiento a 24 horas y 50 minutos para todas las muestras sintetizadas [39].



Según las pruebas de absorción a 24 horas y a cada 5 minutos durante 50 minutos, el hidrogel PG1: AE 0,5 (90%AC, 10%AO) obtuvo mayor porcentaje de absorción, logrando retener hasta un 722% de su peso seco. Por esta razón, se elige sintetizar este material denominado como HG2, para utilizarlo en la aplicación estudiada en el presente trabajo de grado.

El siguiente fue el protocolo que se siguió para el entrecruzamiento del poliglicerol con la mezcla de los dos ácidos.

Tabla B3. Condiciones de reacción para la esterificación de poliglicerol con la mezcla de ácidos.

Condiciones de reacción	
Ácido oleico	0,59 ml
Ácido cítrico	1,086 g
Temperatura	160 °C
Tiempo de polimerización (AO)	10 min
Tiempo de adición del (AC)	1,37 min
Tiempo de esterificación	8min

1. Se inicia la esterificación en el mismo reactor que se ha realizado la polimerización y se ha obtenido el poliglicerol; se apaga la bomba y se cierra la válvula que permite el paso del flujo de nitrógeno. Se adiciona primero el ácido

oleico porque necesita mayor tiempo de reacción. Se enciende la bomba, se abre la válvula de nitrógeno y se deja reaccionar 1 o 2 minutos (tiempo experimental), dependiendo de las cantidades de ácido oleico agregado

2. Transcurrido el tiempo experimental en que se observa la fluidez necesaria de la mezcla reaccionante, se apaga por segunda vez la bomba y se cierra nuevamente la válvula de nitrógeno.

3. Se agrega el ácido cítrico, Se enciende la bomba y se abre la válvula de nitrógeno hasta que el polímero llegue al punto de gel. El tiempo de reacción depende de la cantidad de ácido cítrico y ácido oleico que esté reaccionando, varía entre los 7 y los 12 minutos dependiendo de las condiciones que se presenten.

4. Se apaga la bomba, se cierra la válvula de nitrógeno, se retira el polímero obtenido del reactor, y se lleva a un recipiente de vidrio donde se lava con agua destilada.

Figura B3. a) Poliglicerol éster finalizada la reacción. b) Hidrogel desmoldado en un recipiente de vidrio. c) Hidrogel hinchado en agua destilada.



(a)



(b)



(c)

ANEXO C. Etapa de experimentación preliminar

Experimentación preliminar

Se evalúa la germinación y crecimiento de tres especies de plántulas: tomate (*Lycopersicon esculentum*), pimentón (*Capsicum annuum*) y frijol (*Phaseolus Vulgaris*), en suelo franco arcillo-arenoso en presencia de dos tipos de hidrogel, incluyendo los tratamientos testigo (suelo sin hidrogel). El diseño de experimentación previa consta de tres variables a dos niveles:

- La primera variable es el tipo de hidrogel a evaluar, ya que se sintetizaron dos clases:
 1. Hidrogel a base de poliglicerol con ácido cítrico como agente entrecruzante (HG1).
 2. Hidrogel a base de poliglicerol entrecruzado con una mezcla de ácido cítrico y ácido oleico (HG2).
- La segunda variable es la condición de adición del hidrogel al suelo: previamente hinchado en agua destilada, e hidrogel seco, con el fin de hallar la mejor condición. Los hidrogeles se colocan a hinchar a una proporción de 0.1 g en 100ml de agua destilada por 24 horas.
- La tercera, es el ciclo de riego establecido en cada 3 días para el 50% de los tratamientos y en cada 10 días para los restantes, con el fin de conocer el mejor ciclo de riego para una posterior experimentación.

En la tabla 1. Se muestra el diseño experimental utilizado en cada cultivo de la siguiente manera:

Tabla C1. Condiciones de experimentación para cada tipo de hidrogel a una concentración de 0.5% p/p respecto al suelo; aplicadas a un cultivo de cada tomate.

N°	Tipo de hidrogel	Condición de adición al suelo	Ciclo de riego [días]
1	PG:AC	Hidrogel previamente hinchado	3

2	PG:AC	Hidrogel previamente hinchado	10
3	PG:AC	Hidrogel seco	3
4	PG:AC	Hidrogel seco	10
5	PG:AE	Hidrogel previamente hinchado	3
6	PG:AE	Hidrogel previamente hinchado	10
7	PG:AE	Hidrogel seco	3
8	PG:AE	Hidrogel seco	10
9		Solo suelo	3
10		Solo suelo	10

Tabla C2. Condiciones de experimentación para cada tipo de hidrogel a una concentración de 0.5% p/p respecto al suelo aplicadas a un cultivo de pimentón.

N°	Tipo de hidrogel	Condición de adición al suelo	Ciclo de riego [días]
11	PG:AC	Hidrogel previamente hinchado	3
12	PG:AC	Hidrogel previamente hinchado	10
13	PG:AC	Hidrogel seco	3
14	PG:AC	Hidrogel seco	10
15	PG:AE	Hidrogel previamente hinchado	3
16	PG:AE	Hidrogel previamente hinchado	10
17	PG:AE	Hidrogel seco	3
18	PG:AE	Hidrogel seco	10
19		Solo suelo	3
20		Solo suelo	10

Tabla C3. Condiciones de experimentación para cada tipo de hidrogel a una concentración de 0.5% p/p respecto al suelo aplicadas a un cultivo de fríjol.

N°	Tipo de hidrogel	Condición de adición al suelo	Ciclo de riego [días]
21	PG:AC	Hidrogel previamente hinchado	3
22	PG:AC	Hidrogel previamente hinchado	10

23	PG:AC	Hidrogel seco	3
24	PG:AC	Hidrogel seco	10
25	PG:AE	Hidrogel previamente hinchado	3
26	PG:AE	Hidrogel previamente hinchado	10
27	PG:AE	Hidrogel seco	3
28	PG:AE	Hidrogel seco	10
29		Solo suelo	3
30		Solo suelo	10

En la figura C1 se muestran algunas evidencias del diseño preliminar desde el momento de la siembra hasta la germinación y crecimiento de algunas plántulas de tomate y frijol.

FiguraC1. Imágenes experimentación previa.



ANEXO D. Análisis de resultados y discusión de la experimentación preliminar

Para la etapa de experimentación se sembraron 10 semillas en 10 condiciones diferentes para cada especie de planta: tomate (*Lycopersicum esculentum*), pimentón (*Capsicum annuum*) y frijol (*Phaseolus Vulgaris*), de acuerdo con el diseño de experimentos de la Tabla C1 del anexo C. Los días de medición se tomaron con base a la observación de cambios notorios en las plántulas, referentes a número de semillas germinadas y plantas marchitas en un periodo de 18 días, cuantificando la germinación y el crecimiento en determinados tiempos como se muestra en las siguientes tablas.

1. SEMILLA DE TOMATE

Tabla D1. Número de semillas de tomate que germinaron y crecieron de acuerdo a las condiciones descritas en la tabla C1 del diseño de experimentos preliminares (anexo C).

N°	5 días de siembra	8 días de siembra	13 días de siembra	15 días de siembra	18 días de siembra
1	2	4	4	2	1
2	1	3	6	5	4
3	2	3	4	3	1
4	3	5	6	4	3
5	3	7	6	2	1
6	1	3	5	2	2
7	8	10	10	3	2
8	4	7	7	5	4
9	3	4	5	1	0
10	3	6	5	2	1

Con los resultados obtenidos, se grafican los datos para estudiar y analizar los ciclos de riego, la mejor condición de adición del hidrogel en suelo, mejor condición de germinación, el crecimiento de plantas y la altura promedio que alcanzan para cada especie.

A continuación se muestran las tablas con sus respectivas figuras y análisis:

1.2 Estudio por ciclo de riego

Tabla D2 Semillas de tomate germinadas por condiciones, con ciclo de riego cada 3 días.

N°	5 días	8 días	13 días	15 días	18 días
1	2	4	4	2	1
3	2	3	4	3	1
5	3	7	6	2	1
7	8	10	10	3	2
9	3	4	5	1	0

Figura D1 Numero de semillas germinadas por días para las condiciones (1, 3, 5, 7,9).

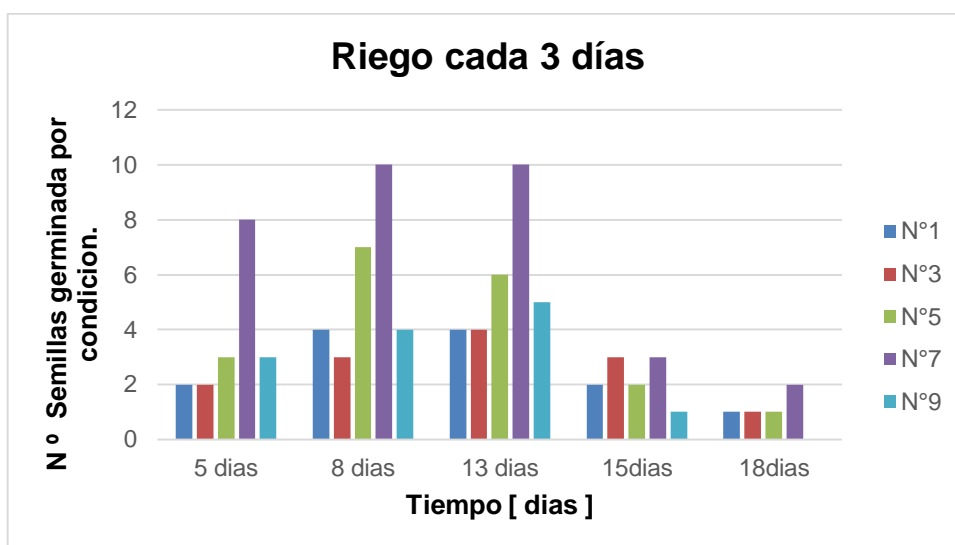
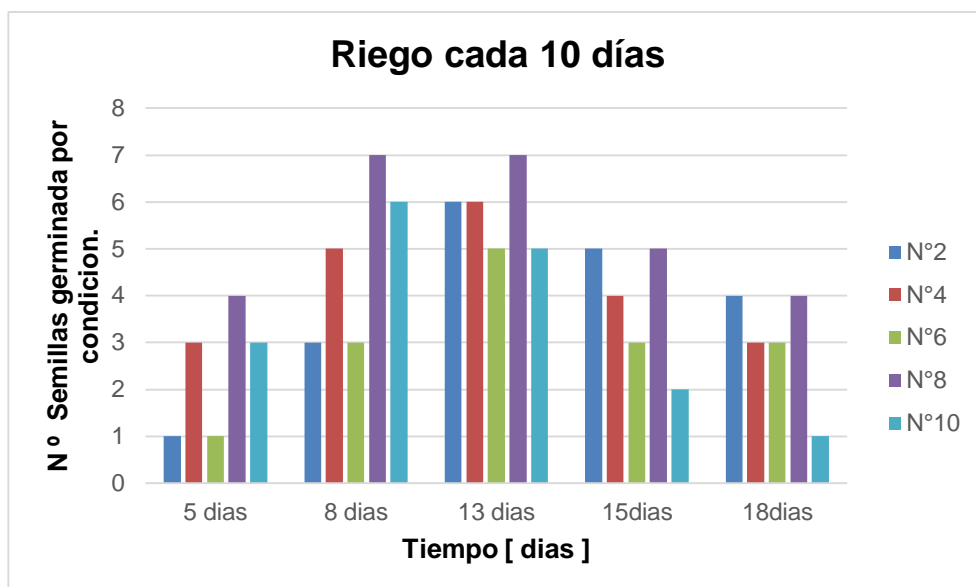


Tabla D3. Semillas de tomate germinadas por condiciones, con ciclo de riego cada 10 días.

N°	5 días	8 días	13 días	15 días	18 días
2	1	3	6	5	4
4	3	5	6	4	3
6	1	3	5	2	2
8	4	7	7	5	4
10	3	6	5	2	1

Figura D2. Numero de semillas germinadas por días, para las condiciones (2, 4, 6, 8 ,10).



1.3 Análisis de resultados y Discusión

- Se puede observar que en todas las condiciones hubo germinación de las semillas, y se presentó hasta un 100% de germinación en la condición N°7 (HG2, seco) y a los 8 días de siembra.
- En las condiciones donde se aplicó el riego cada 10 días, se evidencia una mayor germinación en la condición N°8 (HG2, seco), con un 70% de germinación de plántulas.
- Al comparar los ciclos de riego de cada 3 y cada 10 días para las condiciones N°7 y N°8 (HG2, seco), se observa que a pesar de que la condición N°8 obtuvo un 30% menos de la tasa de germinación respecto a la N°7 al cabo de los 18 días de siembra ésta logró mantener el doble de plántulas vivas.
- En las Figuras D1.1.1 y D1.1.2 se presenta el inicio de la marchitez de plántulas en la mayoría de ellas a partir del día 13, esto puede deberse al agotamiento de los nutrientes en el suelo, indispensables para el crecimiento y desarrollo de las plantas.

1.4 Estudio por condición de adición de hidrogel al suelo:

Tabla D4. Semillas de tomate germinadas por condición, para el hidrogel HG1 (seco e hinchado).

N°	5 días	8 días	13 días	15 días	18 días
1	2	4	4	2	1
2	1	3	6	5	4
3	2	3	4	3	1
4	3	5	6	4	3

Figura D3. Numero de semillas germinadas por días, para las condiciones (1, 2, 3, 4,) con HG1 (seco e hinchado).

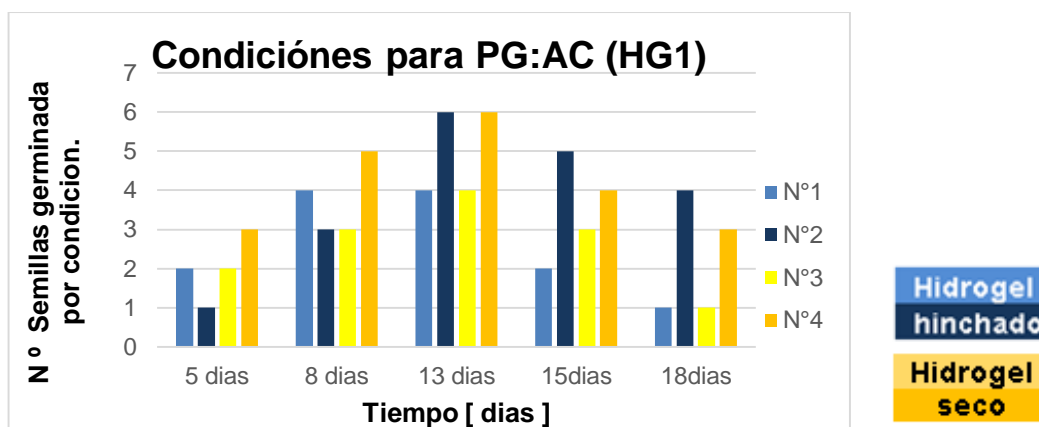
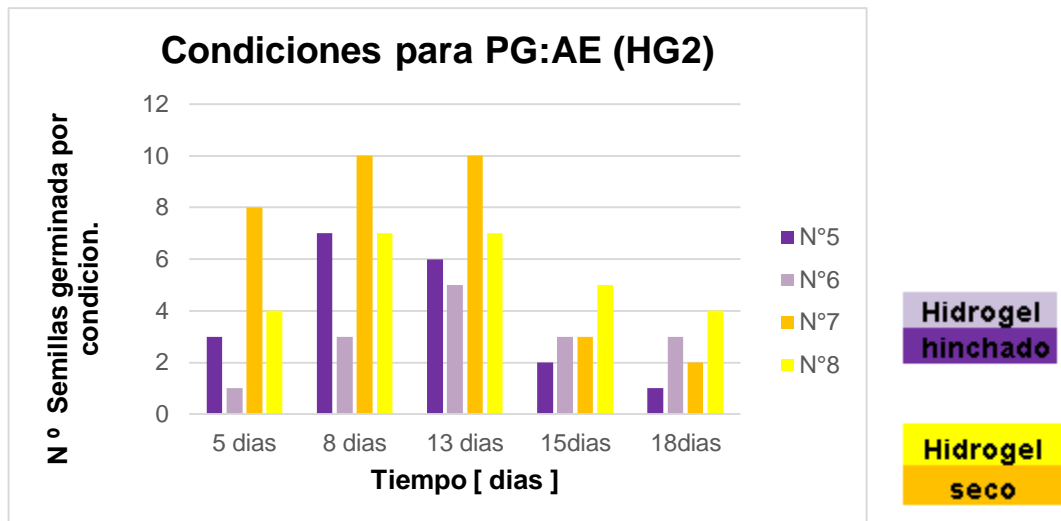


Tabla D5. Semillas de tomate germinadas por condición, para el hidrogel HG2 (seco e hinchado).

N°	5 días	8 días	13 días	15 días	18 días
5	3	7	6	2	1
6	1	3	5	3	3
7	8	10	10	3	2
8	4	7	7	5	4

Figura D4. Numero de semillas germinadas por días, para las condiciones (5, 6, 7, 8) con HG2 (seco e hinchado).



1.5 Análisis de resultados y Discusión

- Al comparar las 2 condiciones de adición de hidrogel seco o previamente hinchado para el hidrogel HG1 se obtuvo la misma tasa de germinación, alcanzando un máximo de 60% a los 13 días de siembra.
- De acuerdo con los resultados se concluye que el mejor tipo de hidrogel para la germinación de semillas de tomate fue el hidrogel PG: AE (HG2) de forma seca con un ciclo de riego 3 días, alcanzando el 100% de la germinación de las plantas en un periodo de 8 días de la siembra.

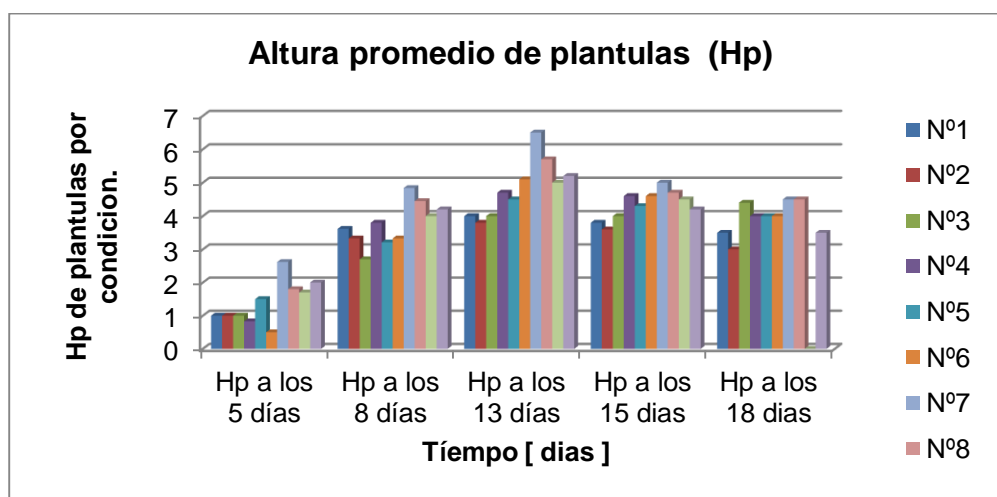
1.6 Estudio del crecimiento de las plántulas de tomate.

Para cuantificar el crecimiento de cada plántula de tomate se midió la altura (H) desde la germinación de cada una de ellas y su respectivo desarrollo con el paso de los días, luego se calcularon alturas promedio (Hp) para cada intervalo de tiempo.

Tabla D6. Altura promedio (Hp), de las plántulas germinadas de acuerdo a las condiciones descritas en la tabla C1 del diseño de experimentos preliminares (anexo C).

N°	Hp a los 5 días	Hp a los 8 días	Hp a los 13 días	Hp a los 15 días	Hp a los 18 días
1	1	3,6	4	3,8	3,5
2	1	3,3	3,8	3,6	3
3	1	2,7	4	4	4,4
4	0,8	3,8	4,7	4,6	4
5	1,5	3,2	4,5	4,3	4
6	0,5	3,3	5,1	4,6	4
7	2,6	4,8	6,5	5	4,5
8	1,8	4,4	5,7	4,7	4,5
9	1,7	4	5	4,5	0
10	2	4,2	5,2	4,2	3,5

Figura D5. Altura promedio alcanzada por las plántulas de tomate en las 10 condiciones de experimentación.



1.7 Análisis de resultados y Discusión

- Se puede inferir de los resultados de la gráfica que el mayor crecimiento se presentó en aquellas condiciones donde se adicionó el hidrogel (HG2)

de forma seca alcanzando una altura de 5,7-6,5 cm a los 13 días de siembra (N°7 y N°8),se infiere que el hidrogel favoreció el crecimiento.

- Las demás condiciones también presentaron tamaños cercanos a los resultados anteriores pero en un periodo más largo de tiempo.

2. SEMILLA DE FRÍJOL

Para este tipo de semilla se decidió sembrar dos frijoles para las diez condiciones del diseño de experimentos, ya que debido a su tamaño no había lugar para más en la pequeña masetta germinadora; y se siguió su germinación y desarrollo en diferentes intervalos de tiempo, los cuales se presentan en la siguiente tabla.

Tabla D7 Número de semillas de frijol que germinaron y crecieron de acuerdo a las condiciones descritas en la tabla C3 del diseño de experimentos preliminar (Anexo C).

Nº	5días	8días	13días	15días	18días
21	0	0	0	0	0
22	1	1	2	2	2
23	0	1	1	1	1
24	1	1	1	1	1
25	0	0	1	1	1
26	0	0	0	0	0
27	0	1	2	2	2
28	0	1	1	1	1
29	0	0	0	0	0
30	0	1	2	2	2

2.1 Estudio por ciclo de riego

Tabla D8. Semillas de frijol germinadas por condiciones, con ciclo de riego cada 3 días.

Nº	5 días	8 días	13 días	15 días	18 días
21	0	0	0	0	0
23	0	1	1	1	1
25	0	0	1	1	1
27	0	1	2	2	2
29	0	0	0	0	0

Figura D7. Numero de semillas germinadas por días, para las condiciones (21, 23, 25, 27,29).

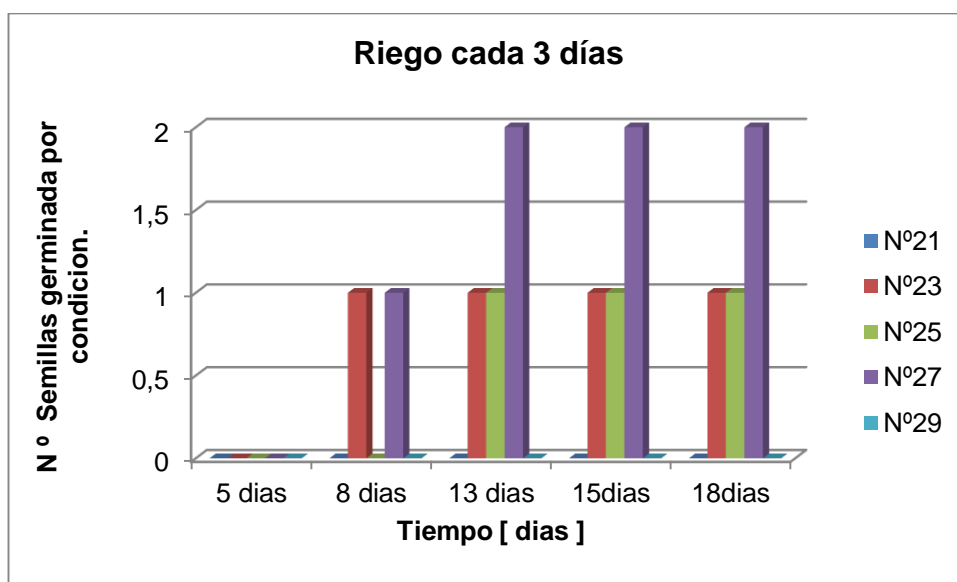
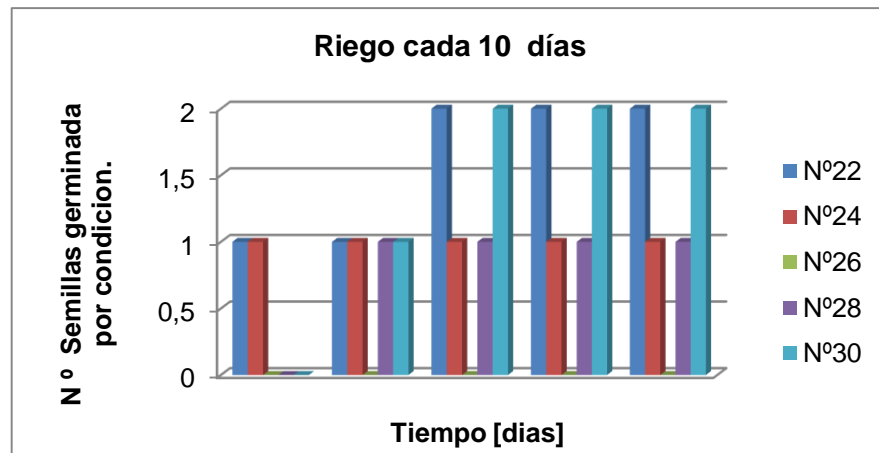


Tabla D9. Semillas de frijol germinadas por condiciones, con ciclo de riego cada 10 días.

Nº	5 días	8 días	13 días	15 días	18 días
22	1	1	2	2	2
24	1	1	1	1	1
26	0	0	0	0	0
28	0	1	1	1	1
30	0	1	2	2	2

Figura D8. Numero de semillas germinadas por días, para las condiciones (22, 24, 26, 28,30).



2.2 Análisis de resultados y Discusión

- La única condición que favoreció la germinación del 100% de las semillas de frijol fue la condición Nº 27 de hidrogel (HG2) de forma seca, a los 13 días de siembra con un riego de cada 3 días.
- No en todas las condiciones germinaron las 2 semillas de frijol, esto puede deberse al espacio en la maseta, sin embargo, se puede observar en la Figura D8 que las condiciones (22 y 24) con hidrogel entrecruzado con ácido cítrico fueron las primeras en germinar a los 5 días de siembra, las demás semillas germinaron a los 8 y 13 de siembra.
- Al comparar los resultados para ciclo de riego de cada 3 días con el ciclo de riego de cada 10 días se observa que para esta última hay una mayor tasa de germinación de las semillas de frijol siendo dos veces mayor, debido a que el exceso de agua afecta negativamente la semilla, haciendo que el embrión se descomponga.

2.3 Estudio por condición de adición de hidrogel al suelo.

Tabla D10. Semillas de frijol germinadas por condición, para el hidrogel HG1 (seco e hinchado).

Nº	5 días	8 días	13 días	15 días	18 días
21	0	0	0	0	0
22	1	1	2	2	2
23	0	1	1	1	1
24	1	1	1	1	1

Figura D9. Numero de semillas germinadas por días, para las condiciones (21, 22, 23, 24,) con HG1 (seco e hinchado).

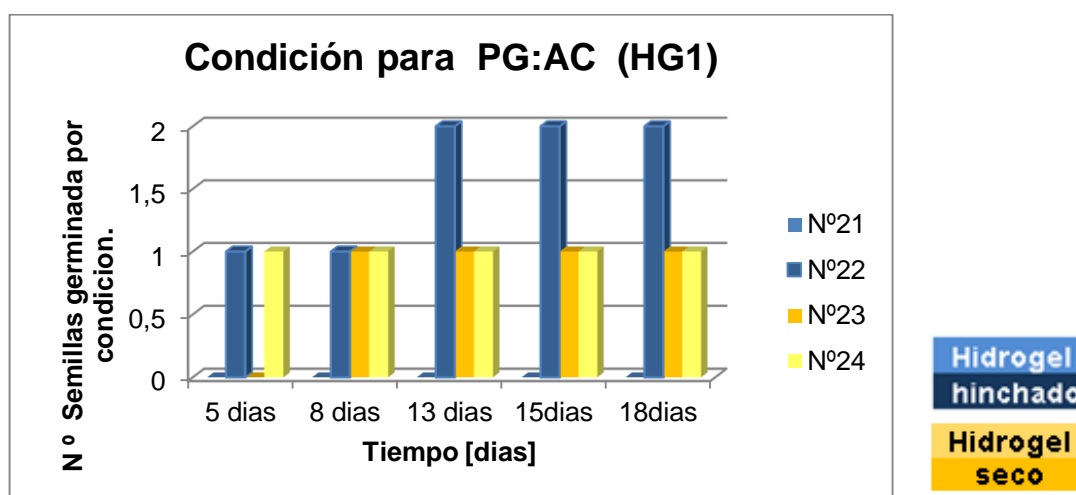
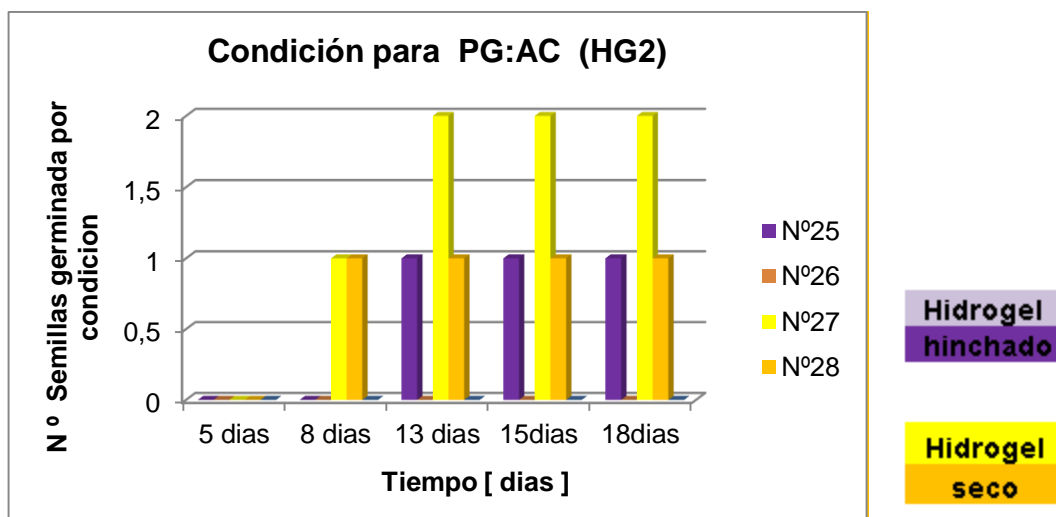


Tabla D11. Semillas de frijol germinadas por condición, para el hidrogel HG2 (seco e hinchado).

Nº	5 días	8 días	13 días	15 días	18 días
25	0	0	1	1	1
26	0	0	0	0	0
27	0	1	2	2	2
28	0	1	1	1	1

Figura D10. Numero de semillas germinadas por días, para las condiciones (25, 26, 27, 28,) con HG1 (seco e hinchado).



2.4 Análisis de resultados y discusión.

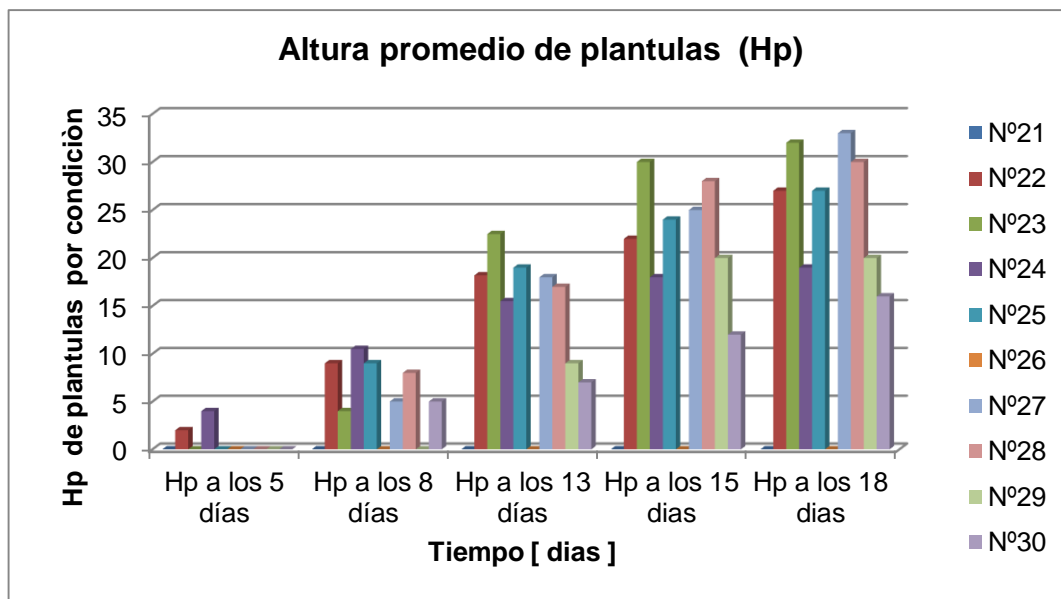
Al comparar las dos condiciones de adición al suelo seco o previamente hinchado de los dos tipos de hidrogel se aprecia que tiene un comportamiento similar respecto a su germinación, para discriminar alguno de los dos tipos se hace necesario comparar su crecimiento y desarrollo.

2.5 Estudio del crecimiento de las plántulas de frijol.

Tabla D12 Altura promedio (Hp) de las plántulas germinadas de acuerdo a las condiciones descritas en la tabla C3 del diseño de experimentos preliminar del anexo C.

N°	Hp a los 5 días	Hp a los 8 días	Hp a los 13 días	Hp a los 15 días	Hp a los 18 días
21	0	0	0	0	0
22	2	9	18,2	22	27
23	0	4	22,5	30	32
24	4	10,5	15,5	18	19
25	0	9	19	24	27
26	0	0	0	0	0
27	0	5	18	25	33
28	0	8	17	28	30
29	0	0	9	20	20
30	0	5	7	12	16

Figura D11. Altura promedio alcanzada por las plántulas de Frijol en las 10 condiciones de experimentación.



2.6 Análisis de resultados y discusión.

- La condición N°23 (HG1, seco) fue la única de este tipo que alcanzó un alto crecimiento, mientras que la mayoría de condiciones experimentales en presencia de hidrogel (HG2, seco) alcanzaron alturas considerables.
- En general se observa que el menor tiempo de germinación de las semillas de frijol se obtuvo en las condiciones N°22 (HG1, hidrogel hinchado y riego de 10 días) y la condición N° 24 (HG1, hidrogel seco), sin embargo, el mayor crecimiento se presentó en las condiciones donde se adicionó el hidrogel (HG2), mostrando un mayor desarrollo biológico por parte de las plántulas de frijo

ANEXO E. Cálculo del área foliar de las plántulas utilizando el software Imagej

Para medir el área foliar de las plántulas de frijol, se eligen las 10 mejores de cada condición, respecto a su altura, número y tamaño de hojas observadas por el investigador en las tres condiciones diferentes. A estas plántulas se les hace un seguimiento de área foliar de acuerdo a su crecimiento y desarrollo fisiológico.

A continuación se muestran los pasos para realizar el cálculo del área foliar para una plántula de frijol a los 8 días de la siembra, perteneciente a la condición 2-28 utilizando el software ImageJ. Para las demás plántulas se realiza el procedimiento de la misma manera.

1. Se toman las fotos de las hojas de la plántula, y se mide el largo de la misma como se muestra en la figura E1.

Figura E1. Fotos de las hojas de una plántula de frijol de la condición 2-28 y su largo.



Largo hoja 1: 3.5 cm

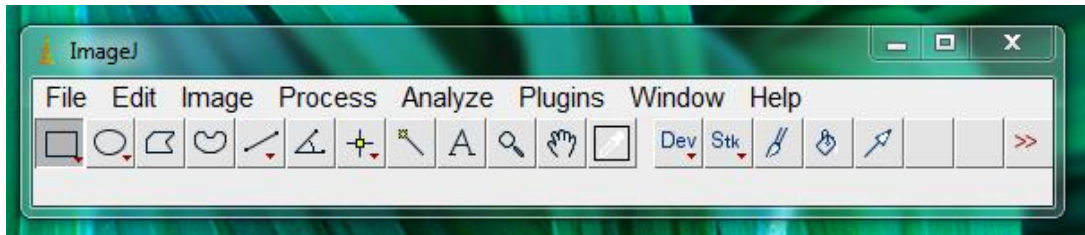


Largo hoja 2: 3.5

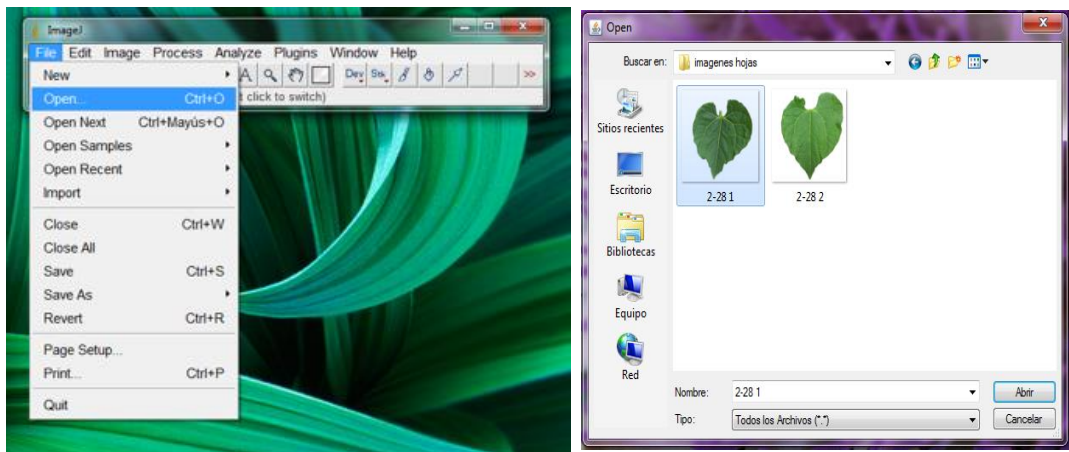
La medida del largo de la hoja sirve como referencia de escala entre los píxeles de la imagen y el tamaño real de la misma.

2. Luego de tener la foto de cada hoja de la planta y la medida del largo, se procede con el cálculo de su área con ayuda del software ImageJ. En la figura E2 se muestra la apariencia del software al momento de abrirlo.

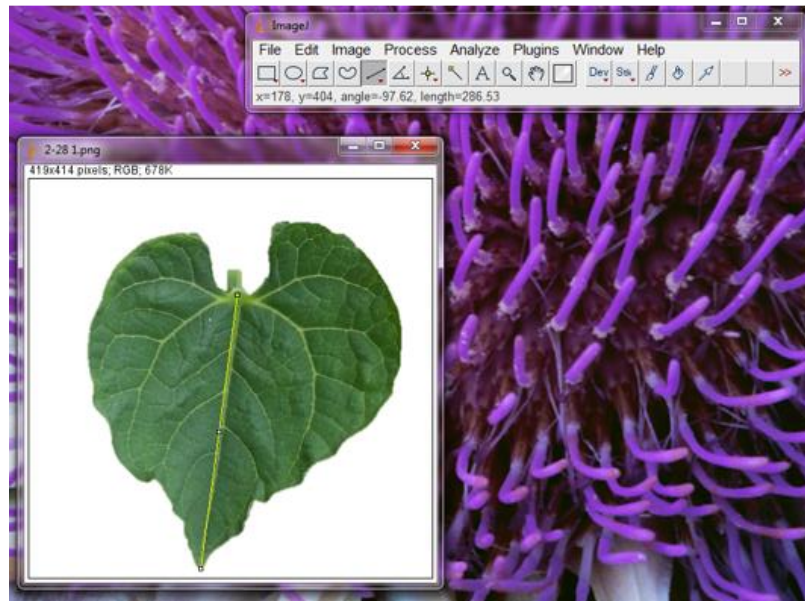
Figura E2. Apariencia del software ImageJ.



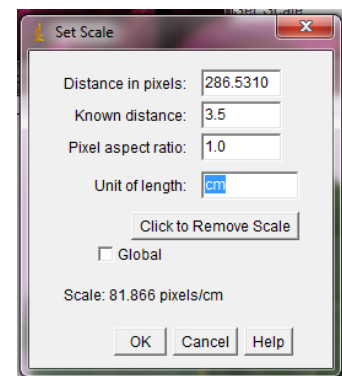
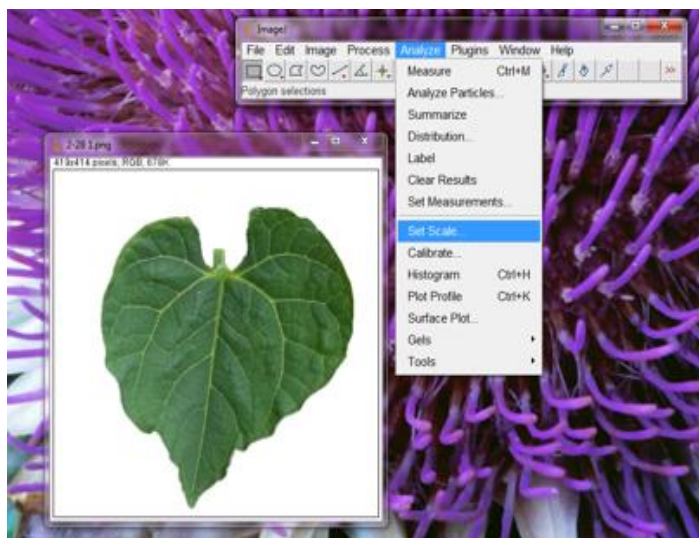
3. Una vez abierto el software, en la opción "file", "open", se abre la imagen de la hoja sobre la cual se desea calcular el área.



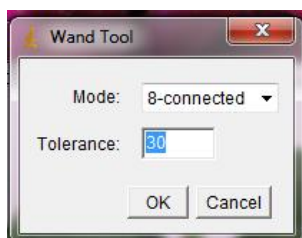
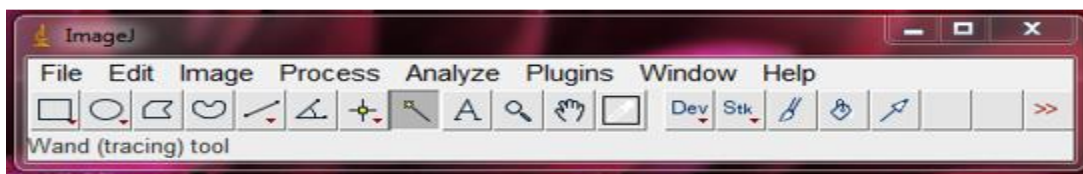
4. Una vez abierta la imagen sobre la que se quiere trabajar, se procede a definir la escala de pixeles tomando como referencia la medida real del largo de la hoja, para ello, con la herramienta "straight", se traza una línea en el largo de la hoja como se midió anteriormente.



5. Luego de trazar la línea, dando click en la opción “Analyze”, “Set Scale” , se introduce el valor real de la medida tomada inicialmente, en la ventana “Know distance” , para este caso es de 3.5 y en la ventana “unit of length” , se colocan las unidades en centímetros (cm)



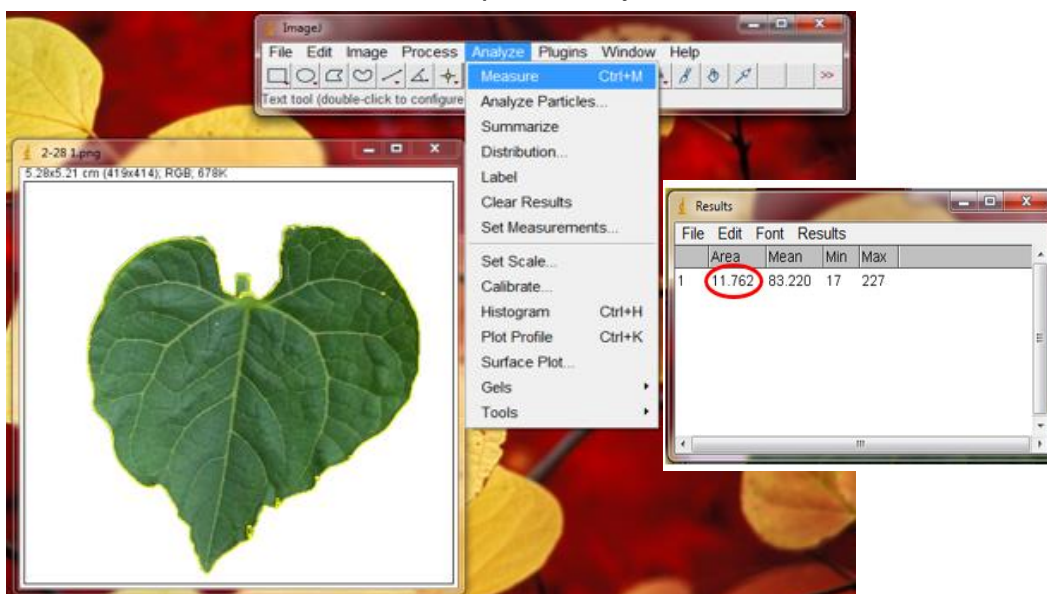
6. Se oprime Ok y con la herramienta “wand tool”, dando doble click sobre ella, se despliega una ventana donde podemos ajustar la tolerancia con que se va a trabajar. Entre mayor sea el valor de dicha tolerancia, mayor será el área que abarca la herramienta.



7. Luego de configurar las opciones, se procede con el uso de la herramienta “wand tool”, con la que se selecciona el área a calcular de la hoja.

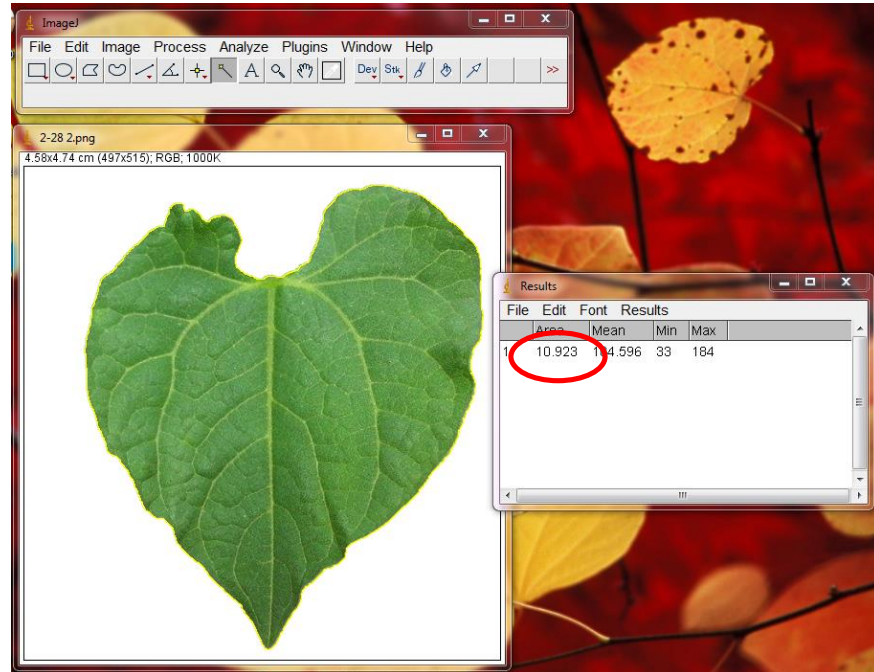


8. Finalmente, dando click en las opciones “Analyze”, “measure”, se muestra el resultado del cálculo del área para la hoja.



Para este caso el área de la hoja es de 11.762 cm².

Para la segunda hoja de la plántula, se realizó el procedimiento de la misma manera y el resultado arrojado por el software fue de 10.923cm².



Para calcular el área total de la plántula se suman las áreas de cada hoja que conforma la planta. Para este caso se suman las dos áreas calculadas:

$$A_T = A_1 + A_2$$

$$A_T = 11.762 \text{ cm}^2 + 10.923 \text{ cm}^2$$

$$A_T = 22.685 \text{ cm}^2$$

Para las demás plántulas elegidas para este estudio, se realiza el cálculo del área foliar siguiendo el mismo procedimiento.

ANEXO F. Resultados de las pruebas de absorción de las muestras sintetizadas.

Tabla F1. Pruebas de absorción para el hidrogel HG1 (PG: AC).

N° muestra	Peso seco (g)	Peso hinchado (g)	% hinchamiento
1	0,081	0,8823	989,2593
2	0,0502	0,4974	890,8367
3	0,0488	0,5583	1044,0574
4	0,0873	0,9625	1002,5200
5	0,0767	0,9625	1154,8892
6	0,1135	1,3608	1098,9427
7	0,0373	0,4605	1134,5845
8	0,079	0,7344	829,6203
9	0,0767	0,9716	1166,7536
10	0,0287	0,3408	1087,4564
11	0,0328	0,3375	928,9634
12	0,0488	0,5063	937,5000
13	0,0373	0,5015	1244,5040
14	0,075	0,8275	1003,3333
15	0,0718	0,7769	982,0334
16	0,0254	0,3612	1322,0472
17	0,0658	0,7223	997,7204
18	0,0412	0,598	1351,4563
19	0,0435	0,5188	1092,6437
20	0,042	0,5962	1319,5238
21	0,0358	0,5065	1314,8045
22	0,0354	0,4648	1212,9944
23	0,0674	0,9568	1319,5846
24	0,12	1,4676	1123,0000
25	0,0316	0,3857	1120,5696
		PROMEDIO	1106,7839
		DESVEST	145,4021

Tabla F2. Pruebas de absorción para el hidrogel HG2 (PG: AE).

N° muestra	Peso seco	Peso hinchado	% hinchamiento
1	0,0535	0,3489	552,1495327
2	0,0415	0,3126	653,253012
3	0,0356	0,2505	603,6516854
4	0,0248	0,2077	737,5
5	0,0618	0,541	775,4045307
6	0,0371	0,3177	756,3342318
7	0,0567	0,386	580,7760141
8	0,0747	0,6035	707,8982597
9	0,1269	1,2389	876,2805359
10	0,1201	0,7422	517,9850125
11	0,1057	0,9365	785,9981079
12	0,1223	0,8051	558,2992641
13	0,1813	1,4954	724,8207391
14	0,1874	1,9203	924,7065101
15	0,1485	1,1392	667,1380471
16	0,204	1,9208	841,5686275
17	0,1393	0,9951	614,3575018
18	0,0393	0,3577	810,178117
		PROMEDIO	704,9055405
		DESVEST	115,6673491

ANEXO G. Análisis fisicoquímico de las muestras de suelo

Tabla G1. Análisis de suelo extraído de la Mesa de los Santos (realizado por Laboratorio químico de suelos, convenio Gobernación de Santander-UIS).

Componentes y medidas	Suelo testigo		Suelo con HG1		Suelo con HG2	
	Composición química	Diagnostico	Composición química	Diagnostico	Composición química	Diagnostico
Arena	50%	-	56%	-	50%	-
Limo	24%	-	18%	-	24%	-
Arcilla	26%	-	26%	-	26%	-
C	%1.22	Bajo	1.76%	Medio	%1.88	Medio
P	1.3 ppm	Bajo	2.2 ppm	Medio	1.19 ppm	Medio
B	0.13 ppm	Bajo	0.17 ppm	Bajo	0.18 ppm	Bajo
Fe	65.4 ppm	Alto	196 ppm	Alto	181 ppm	Alto
Mn	0.44 ppm	Bajo	2.30 ppm	Alto	2.02 ppm	Alto
Cu	2.06 ppm	Medio	0,09 ppm	Bajo	0.10 ppm	Bajo
Zn	1.12 ppm	Bajo	1,04 ppm	Bajo	0,86 ppm	Bajo
Mg	0.19 meq/100g suelo	Bajo	0.93 meq/100g suelo	Medio	0.93 meq/100g suelo	Bajo
Na	0.14 meq/100g suelo	Normal	0.15 meq/100g suelo	Normal	0.21 meq/100g suelo	Normal
K	0.16 meq/100g suelo	Bajo	0.48 meq/100g suelo	Medio	0.41 meq/100g suelo	Bajo
Al	2.0 meq/100g suelo	Alto	3.0 meq/100g suelo	Alto	2.4 meq/100g suelo	Alto
Ca	1.37 meq/100g suelo	Bajo	1.44 meq/100g suelo	Bajo	1.58 meq/100g suelo	Bajo
PH	5.2		4		4,1	

ANEXO H. Análisis ANOVA en la evaluación del crecimiento de las plántulas de frijol

Tabla H1. Tabla de análisis de varianza.

Origen de las variaciones	Suma de los cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	Valor F	Valor P Prob > F	Significativo
Bloques	6684,71	99	67,52			
Factor -Tipo de HG	1013,61	2	506,81	9,04	0,0002	
Residual	11098,89	198	56,05			
Total	18797,21	299				

Tabla H2. Resultados promedio y desviación estándar para los niveles de experimentación.

Nivel	Promedio	Desviacion Estandar
1- sin HG	6,23	0,75
2- conHG1	4,78	0,75
3- con HG2	9,37	0,75

ANEXO I. Resultados de desarrollo de plántulas por conteo de hojas

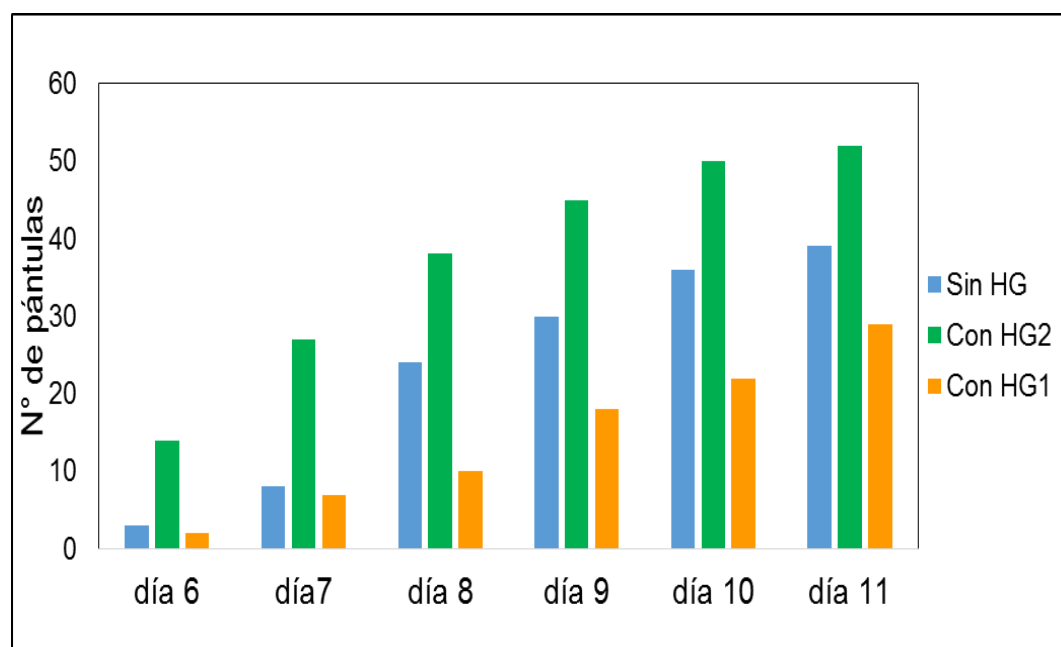
1. Número de Plántulas que presentaron el primer par de hojas.

Por medio de la observación diaria de las plántulas germinadas en cada condición, se realizó el conteo de las plántulas que presentaron el primer par de hojas a partir del sexto día después de la siembra, hasta el día 10 donde se observó que comenzaron a salir las hojas trifoliadas.

Tabla I1. Número de plántulas que presentaron el primer par de hojas, en cada nivel de experimentación.

nivel	día 6	día7	día 8	día 9	día 10	día 11
1	3	8	24	30	36	39
3	14	27	38	45	50	52
3	2	7	10	18	22	29

Figura I1. Número de plántulas que presentaron el primer par de hojas, en cada nivel de experimentación.



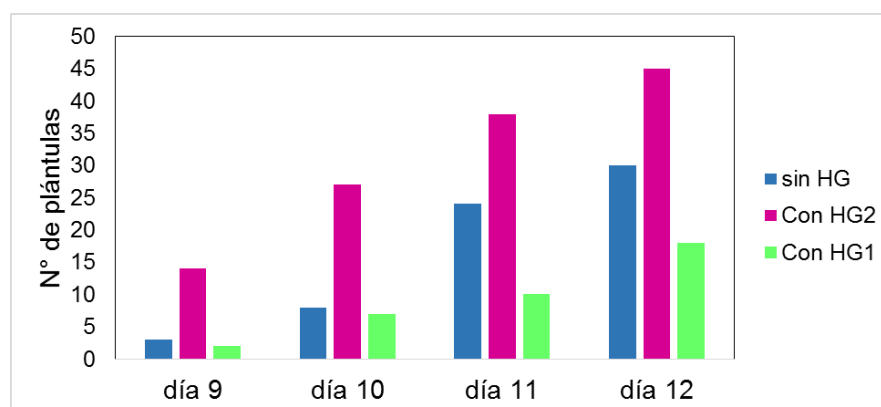
2. Número de Plántulas que presentaron las hojas primarias y el primer par de trifoliadas.

Se realizó el conteo de las plántulas que presentaron las hojas primarias y las hojas trifoliadas, partir del noveno día después de la siembra, hasta el día 12, donde las plántulas pasan a ser plantas.

Tabla I2. Número de plántulas que presentaron las hojas primarias y primer par de trifoliadas, en cada nivel de experimentación.

nivel	día 9	día 10	día 11	día 12
1	3	8	24	30
3	14	27	38	45
3	2	7	10	18

Figura I3. Número de plántulas que presentaron las hojas primarias y primer par de trifoliadas, en cada nivel de experimentación.

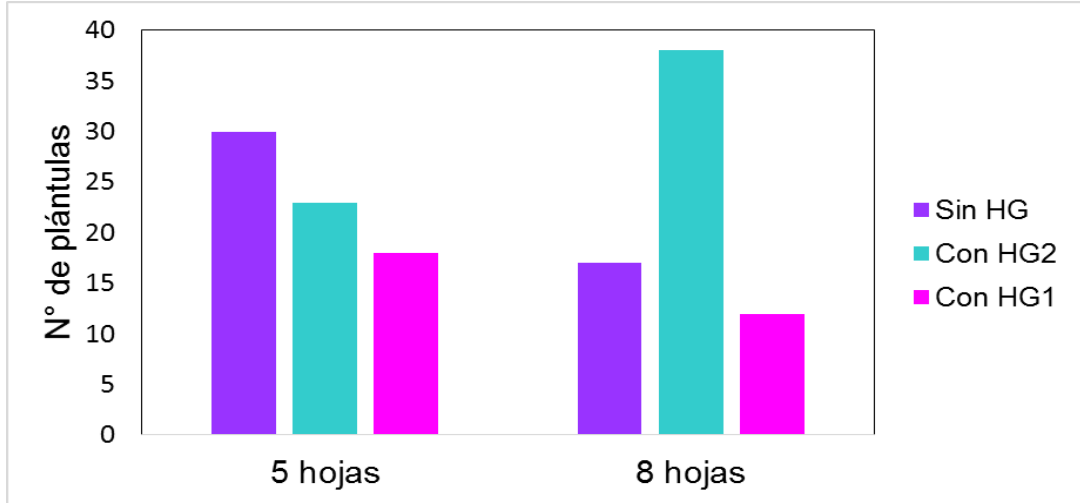


3. Número de Plantas que presentaron 5 y 8 hojas al final de la experimentación.

Tabla I4. Número de plantas de cada nivel que presentaron 8 y 5 hojas al final del experimento.

nivel	5 hojas	8 hojas
1	30	17
2	23	38
3	18	12

Figura I4. Número de plantas de cada nivel que presentaron 8 y 5 hojas al final del experimento.



ANEXO J. Evidencias del estudio de la aplicación agrícola de hidrogeles

Se llevó a cabo el diseño de experimentos con 100 réplicas de cada nivel (suelo sin hidrogel, suelo con hidrogel HG1 y suelo con hidrogel HG2), Para un total de 300 tratamientos. A continuación se presentan algunas figuras como evidencias de la siembra, seguimiento de las etapas de germinación y crecimiento alcanzado por las plántulas de frijol en los 20 días de experimentación.

Figura J1. Siembra de los 300 tratamientos, día cero de la experimentación.



Figura J2. Germinación de las semillas de frijol en todas sus etapas hasta plántulas.



Figura J3.
 Crecimiento y desarrollo biológico alcanzado por las plantas de frijol terminada la experimentación.



Figura J4. Comparación de desarrollo entre niveles de experimentación.

