

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA



EFECTO DE GELES A BASE DE POLISACÁRIDOS EN LA GERMINACIÓN Y
CALIDAD DE PLÁNTULAS DE MAÍZ

POR

MANUEL ANTONIO MACIAS ENCINA

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA

SALTILLO, COAHUILA

DICIEMBRE 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA

EFFECTO DE GELES A BASE DE POLISACARIDOS EN LA GERMINACIÓN Y
CALIDAD DE PLANTULA DE MAIZ

TESIS

PRESENTADA POR

MANUEL ANTONIO MACIAS ENCINA

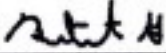
QUE SE SOMETE A LA CONSIDERACIÓN DEL JURADO EXAMINADOR,
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA

A P R O B A D A




Dra. Sonia Noemí Ramírez Barrón
Presidente



Dra. Rebeca Betancourt Galindo
Vocal



Dr. Héctor Iván Meléndez Ortiz
Vocal



Dr. Jorge Luis Sánchez Orozco
Vocal



M.C. Sergio Sanchez Martínez
Coordinador de la División de Ingeniería

Buenvista, Saltillo, Coahuila, México
Diciembre de 2025

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRIARIA ANTONIO NARRO

UNIDAD SALTILLO

EFFECTO DE GELES A BASE DE POLISACARIDOS EN LA GERMINACIÓN Y
CALIDAD DE PLANTULA DE MAIZ

TESIS

ELABORADA POR:


MANUEL ANTONIO MACIAS ENCINA

BAJO LA SUPERVISIÓN DEL COMITE DE ASESORÍA Y APROBADA COMO
REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL GRADO DE:

INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA



Dra. Sonia Noemí Ramírez Barrón
Asesor



Dra. Rebeca Betancourt Galindo
Co-asesor



Dr. Héctor Iván Meléndez Ortíz
Asesor externo



Dr. Jorge Luis Sánchez Orozco
Co-asesor

INDICE GENERAL

ÍNDICE	1-2
AGRADECIMIENTOS	3
DEDICATORIA	4
RESUMEN	5-6
ABSTRACT	7
I. INTRODUCCIÓN	8
1.1 Planteamiento del problema.....	9
II. GENERALIDADES	
2.1 Hidrogeles.....	9-11
2.2 Hidrogeles a base de polisacáridos.....	11-12
2.3 Hidrogeles a base de polisacáridos empleados en agricultura.	
2.3.1 Maltodextrina	15-16
2.3.2 Quitosano.....	16-17
2.4 Técnicas de caracterización de hidrogeles	
2.4.1 Espectroscopia de infrarrojo (FT-IR).....	17
2.4.2 Análisis Termogravimétrico (TGA).....	17-18
III. ANTECEDENTES	
3.1 Hidrogeles a base de polisacáridos empleados en agricultura.....	19-24
IV. JUSTIFICACIÓN E HIPÓTESIS	25
V. OBJETIVOS	
5.1 Objetivo general.....	26
5.2 Objetivos específicos.....	26
VI. MATERIALES Y METODOS	
6.1 Modificación de Maltodextrina (MD) con metacrilato de glicidilo (GMA)....	27
6.2 Modificación de quitosano (CS) con anhídrido maleico (MA).....	27-28
6.3 Síntesis del hidrogel poli (Maltodextrina-co-quitosano) (MD-co-CS).....	28
6.4 Evaluación del efecto del hidrogel sobre el crecimiento y desarrollo de	

plántulas de maíz.....	28
6.4.1 Preparación de soluciones de la mezcla física MD-CS.....	28-29
6.4.2 Preparación de dispersiones del hidrogel poli(MD-co-CS).....	29
6.4.3 Evaluación de crecimiento vegetal.....	29-32

VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Modificación de MD con GMA	33-35
7.2 Modificación de CS con MA.....	34-35
7.3 Síntesis de hidrogeles de poli (MD-co-CS)	
7.3.1 Espectroscopia de Infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR).....	35-37
7.3.2 Análisis termo gravimétrico (TGA).....	37-38
7.3.3 Pruebas de hinchamiento.....	38-41
7.4 Evaluación del efecto de mezcla física de polisacáridos sobre el porcentaje de germinación y crecimiento vegetal.....	41
7.4.1 Determinación del porcentaje de germinación.....	42
7.4.2 Efecto sobre el crecimiento de altura de plúmula y longitud de radícula.....	42-43
7.4.3 Determinación de porcentaje de agua.....	43-44
7.5 Evaluación del efecto de los hidrogeles de poli(MD-co-CS) sobre el porcentaje de germinación y crecimiento vegetal.....	45
7.5.1 Determinación del porcentaje de germinación.....	45-46
7.5.2 Efecto sobre la longitud de radícula.....	46
7.5.3 Efecto sobre el crecimiento de altura de plúmula.....	47-48
7.5.4 Determinación de porcentaje de agua.....	48-49

VIII. CONCLUSIONES	50-51
---------------------------------	-------

IX. REFERENCIAS	52-57
------------------------------	-------

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Centro de Investigación en Química Aplicada a través del proyecto interno 6797 por la beca otorgada para la realización de esta tesis.

De igual manera agradezco a la Q.FB. Bertha Puente Urbina del Centro de Investigación en Química Aplicada por su apoyo técnico en el laboratorio B2.

También agradezco al I.Q. Jesús Alfonso Mercado Silva del Centro de Investigación en Química Aplicada por su apoyo en los estudios de caracterización de los materiales.

Por último, agradezco al Dr. Héctor Iván Meléndez Ortiz del Centro de Investigación en Química Aplicada por su apoyo aportado durante todo el proceso de investigación

DEDICATORIAS

A mis padres, y a mi familia por haberme brindando el apoyo para convertirme en la persona en quien soy el día de hoy. Este trabajo es el reflejo directo de su presencia en mi vida . Los amo profundamente.

RESUMEN

La agricultura es de los sectores productivos que más consume agua, esto junto con el aumento de la población en los últimos años ha generado una preocupación por la administración y una posible escasez de agua en los próximos años, motivo por el cual se ha estado desarrollando nuevas tecnologías para mejorar el manejo y conservación del agua, motivo por el cual el uso de los hidrogeles ha llamado la atención.

Los hidrogeles son una serie de matrices poliméricas que tienen la capacidad para retener una gran cantidad de agua y de liberarla gradualmente, lo cual reduce la necesidad de riego constante, además de mejora la germinación de semillas, el crecimiento de plántula y raíces, la sobrevivencia de semillas, además previene la erosión de tierra, incluso previene la sobredosis de fertilizantes o pesticidas.

Los hidrogeles pueden ser de origen natural o de origen sintético, los primeros están compuestos principalmente de polímeros y de copolímeros de acrilamida y de ácido acrílico, los cuales, tienen gran resistencia mecánica y una gran capacidad de retención de agua, aunque esto presenta la desventaja de que difícilmente se degradan, motivo por el cual, se busca realizar hidrogeles de origen natural, los cuales están compuestos principalmente a base de polímeros tales como los polisacáridos, dichos hidrogeles no presentan la misma rusticidad que los hidrogeles sintéticos, pero los estudios han demostrado que los hidrogeles de origen natural son biodegradables, lo que reduce su impacto ambiental al descomponerse en condiciones naturales.

Para observar los posibles efectos de hidrogeles naturales sobre los cultivos, en este trabajo se sintetizaron y caracterizaron de hidrogeles a base de maltodextina y quitosano mediante la polimerización de radicales libres. Dicho hidrogel se elaboró con las cantidades de 0, 1 y 2.5% del agente entrecruzante N,N´metilen-bis acrilamida (NMBA) para poder evaluar su efecto sobre la germinación y desarrollo de plántulas de maíz.

ABSTRACT

Agriculture is one of the productive sectors that consumes the most water. This, along with the population increase in recent years, has generated concern about water management and a possible shortage in the coming years. For this reason, new technologies have been developed to improve water management and conservation, which is why the use of hydro gels has attracted attention.

Hydrogels are a series of polymer matrices that can retain a large amount of water and release it gradually, reducing the need for constant irrigation. They also improve seed germination, seedling growth, seed survival, and root development, prevent soil erosion, and even prevent the overuse of fertilizers or pesticides.

Hydrogels can be of natural or synthetic origin. Synthetic hydrogels are mainly composed of polymers and copolymers of acrylamide and acrylic acid. They have high mechanical resistance and a high-water retention capacity, although this has the disadvantage that they are difficult to degrade. For this reason, efforts are underway to produce hydrogels of natural origin, which are mainly composed of polymers such as polysaccharides. These hydrogels do not have the same robustness as synthetic hydrogels, but studies have shown that hydrogels of natural origin are biodegradable, which reduces their environmental impact when they decompose under natural conditions.

To observe the potential effects of natural hydrogels on crops, maltodextrin- and chitosan-based hydrogels were synthesized and characterized in this work using free-radical polymerization. These hydrogels were prepared with 0, 1, and 2.5% of the crosslinking agent N,N'-methylene-bisacrylamide (NMBA) to evaluate their effect on the germination and development of maize seedlings.

I. INTRODUCCIÓN

El crecimiento acelerado de la población ha traído consigo un aumento en el uso de agua potable en el sector industrial, doméstico y agrícola (siendo este el que ocupa hasta un 70% del uso de agua potable) motivo por el cual existe una búsqueda constante de alternativas que disminuyan el uso del agua, siendo una de estas tecnologías el uso de hidrogeles por sus prometedores resultados en la retención de agua en los suelos agrícolas.

Actualmente, se utiliza tecnologías de riego como micro-regadora de baja presión o sistemas de riego por goteo con horarios de riego que optimizan el uso de agua, estos métodos combinados con el uso de películas plásticas reducen significativamente el riego y optimizan el uso de agua. La desventaja de estas tecnologías es que casi solo se utilizan en cultivos de alto valor y requieren de una capacitación, de mantenimiento y de una gran inversión inicial, motivo por el cual se busca desarrollar la aplicación de hidrogeles para aumentar el rendimiento de las cosechas y a la vez reduciendo el consumo de agua. Los hidrogeles de polímeros naturales (en especial los polisacáridos) se han utilizado de gran manera por ser inocuos, abundantes y biocompatibles.

1.1 Planteamiento del problema

El problema principal del uso de hidrogeles es que los principales utilizados en la actualidad son de origen sintético, lo cual ha generado una preocupación por su baja solubilidad y la posibilidad de alguna toxicidad existente, motivo por el cual se busca estudiar el efecto de los geles a base de polisacáridos en la germinación y en la calidad de plántulas de maíz como alternativa, ya que al ser un hidrogel híbrido existe la posibilidad de tener una mayor solubilidad, así reduciendo el impacto al medio ambiente y liberando al usuario/consumidor de cualquier inquietud.

II. GENERALIDADES

2.1 Hidrogeles

Los hidrogeles son una serie de matrices poliméricas que a corto plazo se hinchan en agua sin disolverse, su estructura consiste en una red viscoelástica tridimensional que se hincha con el agua, esta red permite la difusión y la adhesión de células y moléculas, por lo cual ha generado un gran interés en aplicaciones biomédicas como terapia celular, curación de heridas, regeneración de hueso/cartílago y de la liberación gradual de fármacos. [1]

En hidrogeles poliméricos la densidad de entrecruzamiento y la hidrofiliidad del polímero son factores que determinan la capacidad de hinchamiento y su duración. Los hidrogeles se pueden clasificar en dos categorías, en permanentes (geles químicos) y en pseudo-geles (geles físicos). Los hidrogeles químicos se sintetizan mediante la formación de enlaces covalentes entre cadenas poliméricas, los cuales forman una estructura estable y permanente, lo que significa que el hidrogel no regresa a su

estructura polimérica original cuando el hidrogel se calienta o se expande. Además, los hidrogeles químicos/permanentes tienen una red tridimensional sostenida mediante fuertes enlaces químicos, lo cual le brinda estabilidad y una excelente fuerza mecánica.

El entrecruzamiento químico involucra aditivos químicos o iniciadores para formar enlaces covalentes entre cadenas poliméricas. El formaldehído y el glutaraldehído comúnmente se utilizan como aditivos químicos en el entrecruzamiento de los hidrogeles. Estos aditivos pueden reaccionar con grupos funcionales dentro de las cadenas poliméricas, formando enlaces covalentes y así estabilizando a la estructura del hidrogel. Además, se pueden utilizar potasio y amonio como iniciadores de reacciones químicas que llevarán a cabo un entrecruzamiento.

Por otro lado, la estructura de estos hidrogeles no suele ser homogénea, ya que dentro de ella se suelen presentar regiones de alta densidad de entrecruzamiento con bajo grado de hinchamiento (“clusters”) dispersas dentro de las regiones de baja densidad de entrecruzamiento con alto índice de hinchamiento. La presencia de los “clusters” es debido a las características hidrófobas del agente entrecruzante, que en algunos casos puede influir en la formación de macro poros.

Mientras que los hidrogeles físicos están formados mediante varias interacciones no-covalentes tales como el enredamiento de cadenas, fuerzas electrostáticas, interacciones hidrofóbicas o enlaces de hidrogeno. Los hidrogeles físicos pueden pasar por transformaciones reversibles, donde el calentar o expandir al hidrogel rompe las interacciones no-covalentes, convirtiendo al hidrogel en una solución de polímeros [2].

Los métodos de entrecruzamiento físico se basan en la interacción de enlaces no-covalentes para formar la red de los geles. Estos hidrogeles se pueden formar mediante el enfriamiento de una solución polimérica para inducir la formación de geles o mediante el ajustamiento del pH o fuerza iónica de la solución para promover la gelación.

La presencia grupos carboxilato (COOH-) cargados negativamente dentro de las redes de hidrogeles puede causar repulsión electrostática dentro de estos grupos. Esta repulsión causa que las cadenas poliméricas se separen una de otra, lo que da como resultado una estructura de poros dentro del hidrogel. Esta estructura porosa permite la penetración y la absorción de moléculas de agua cuando entra en contacto con el gel, las moléculas de agua son atraídas hacia los grupos hidrofílicos (-COO-) mediante interacciones electrostáticas, las cuales aumentan la capacidad de absorción de agua del hidrogel.

2.2 Hidrogeles a base de polisacáridos

Los hidrogeles basados en polisacáridos presentan biocompatibilidad y la similitud de sus propiedades físicas con tejidos naturales, además resultan atractivos para explorar sus aplicaciones en el campo agrícola, donde se han mostrado resultados prometedores para la retención y liberación gradual del agua. También se ha reportado que el uso de estos hidrogeles mejora las propiedades físicas del suelo, lo que ha reducido la erosión y compactación de los suelos, influyendo de manera directa en la germinación de semillas y en el desarrollo de plántulas tanto en el crecimiento como en la calidad de raíz y plúmula [3].

La elaboración de hidrogeles a base de la transformación de polisacáridos como almidón y quitina, ha tenido un aumento en interés, ya que su aplicación suele ser más atractiva que los hidrogeles sintéticos en algunas áreas por su biodegradabilidad. Sus propiedades hidrofílicas se deben a la presencia de grupos hidroxilo (-OH), carboxilo (-COOH), amida (-CONH₂) y sulfónico (SO₃H) a lo largo de sus cadenas poliméricas [4].

El agua hace que el hidrogel se expanda y alcance el hinchamiento mediante un balance entre las fuerzas osmóticas, las cuales causan que el agua penetre entre las cadenas del polímero hidrófilo y las fuerzas entre esas cadenas que oponen resistencia a la expansión. Es decir, durante el hinchamiento las cadenas que forman la red se estiran, mientras que existe una fuerza en sentido contrario (de contracción ejercida sobre las cadenas de la red sobre el disolvente). El hinchamiento alcanza su valor máximo/ de equilibrio cuando se obtiene un balance entre ambas fuerzas. Durante el proceso de secado se colapsa la estructura del hidrogel, causando que se expulse al disolvente (este proceso puede ser reversible).

2.3 Hidrogeles a base de polisacáridos empleados en agricultura.

Los hidrogeles son una serie de redes poliméricas entrecruzadas que pueden absorber y retener una gran cantidad de soluciones acuosas o fluidos biológicos dentro de su propia estructura, motivo por el cual se le ha encontrado una gran serie de aplicaciones, entre ellas en el campo agrícola para la retención y liberación de agua y de agroquímicos [5], en el campo médico para la ingeniería de tejidos [6], y en el industrial en la inmovilización de enzimas [7] y tratamiento de aguas contaminadas [8].

Se han desarrollado hidrogeles superabsorbentes para aplicarse en el campo agrícola, especialmente dentro de regiones secas y desérticas para mejorar las propiedades físicas del suelo, así reduciendo la cantidad y frecuencia de riego, la mortalidad de plántulas y a la vez mejorando la fertilidad del suelo [9].

Un ejemplo es el uso de hidrogel poliacrilato de sodio (un hidrogel sintético) el cual absorbe agua durante lluvia y riego, llegando a hincharse hasta 200 veces su masa original. El agua es liberada de manera gradual mediante difusión en lo que el suelo va perdiendo su humedad. La difusión ocurre como respuesta a la demanda de agua del cultivo, ya que las raíces de las plantas van agotando a las reservas de agua mediante transpiración, creando un gradiente que causa la desorción del hidrogel, lo que ayudaría en la toma de agua por parte de las plantas y mejorar su crecimiento.

Los hidrogeles poliméricos son insolubles y tienen la capacidad de aumentar la retención agua, ayudando a la eficiencia de su uso, mejorando la permeabilidad del suelo y la rapidez de infiltración, reduciendo de esta manera la frecuencia del riego, la compactación del suelo, la erosión y escurrimiento. Otras ventajas que brindan los hidrogeles son que permiten el crecimiento y la sobrevivencia de las plántulas, la areación y drenaje del suelo, controlando la liberación de fertilizantes, y ayudando en la capacidad de absorción de agua y/o favoreciendo la toma de algunos nutrientes que necesitan las plantas [10].

Sin embargo, la mayoría de los hidrogeles superabsorbentes están hechos a partir de monómeros basados en petróleo como ácido acrílico y acrilamida, motivo por el cual

no son biodegradados fácilmente, lo que significa que pueden permanecer dentro del suelo como residuos microplásticos. Otro factor para considerar es que su vida útil es limitada por su baja tolerancia a la sal y bajas propiedades mecánicas.

Debido a esto, se han desarrollado hidrogeles híbridos mediante reacciones de entrecruzamiento de polímeros naturales tales como alginato de sodio siendo un polímero natural o con polímeros sintéticos como el caso de ácido acrílico. Algunos ejemplos de estos hidrogeles reportados para su uso en agricultura son alcohol polivinílico/Quitosano para una liberación controlada de fertilizantes [11] y acrilamida/carboximetil celulosa para una liberación controlada de agroquímicos [12].

La propiedad principal de los hidrogeles superabsorbentes es su habilidad para absorber y mantener grandes cantidades de agua cientos de veces mayor que su propio peso sin disolverse. La capacidad que tiene para absorber y retener agua depende de las características de hinchamiento del hidrogel, las cuales están relacionadas directamente con la elasticidad de la red y de la presencia de grupos funcionales y/o de las cargas polarizadas. Los grupos funcionales como COONa y OH incrementan la cantidad de agua absorbida fijada, ya que el agua dentro del hidrogel no se encuentra de forma libre sino unida a grupos funcionales.

Recientemente, se ha estudiado a los polímeros naturales, en especial a los polisacáridos tales como quitosano, carboximetil celulosa, pectina, almidón y alginato para la elaboración de hidrogeles superabsorbentes debido a que presentan ciertas ventajas con respecto a los sintéticos tales como abundancia en la naturaleza, bajos costos, biodegradabilidad, no toxicidad y por ser materiales útiles para la entrega de nutrientes en

plantas [13]. Además, otra ventaja de estos materiales es que comienzan a degradarse en poco tiempo (meses, semanas) de su aplicación por las enzimas degradadoras producidas por la mayoría de los organismos procariotas y eucariotas que se encuentran en el suelo.

Existen dos tipos de hidrogeles superabsorbentes para el uso agrícola, los solubles en agua y los insolubles en agua. Los que son solubles en agua presentan una estructura compuesta por cadenas lineales y se utilizan para mejorar el suelo y estabilizarlo, reduciendo la erosión y mejorando la capacidad de percolación. Mientras que en los insolubles en agua su estructura está compuesta por una serie de cadenas entrecruzadas que forman una red tridimensional (tales como poliacrilatos, poliacrilamidas y polímeros de acrilamida-acrilato entrecruzados).

2.3.1 Maltodextrina

La maltodextrina es un polisacárido altamente soluble en agua y poco a nada soluble en alcohol que se encuentra como un polvo blanco higroscópico el cual se obtiene a partir del almidón. El almidón también conocido como fécula es un polisacárido que se encuentra en alimentos como el maíz, papa, trigo mediante una hidrólisis ácida o enzimática y que se recupera mediante secado por aspersion [14, 15].

La maltodextrina, se utiliza comúnmente en el área farmacéutica como agente de dilución en tabletas (pastillas) y agente de recubrimiento en la microencapsulación de medicamentos y suplementos (como vitaminas).

Además, se utiliza en el área de alimentos como texturizante, estabilizador y principalmente como agente de relleno, su aplicación depende de la cantidad de la equivalencia de la dextrosa (DE), es decir entre mayor DE, mayor el nivel de hidrólisis requerido, lo que da como resultado una menor masa molecular de los componentes de la maltodextrina. La maltodextrina con un DE menor es más viscosa, motivo por el cual se utiliza en productos gelatinosos como jarabes o jaleas, mientras que la maltodextrina que contiene un mayor contenido de dextrina se congela de una mejor manera, motivo por el que se utiliza como agente de relleno en helados.

2.3.2 Quitosano

El quitosano es un polisacárido que se obtiene mediante la desacetilación de la quitina [16]. La quitina es un biopolímero que puede ser encontrado en los exoesqueletos de crustáceos, cutícula de insectos, algas y en las paredes celulares de los hongos.

Comúnmente se utiliza como un agente coagulante y floculante en la industria alimentaria, farmacéutica, biomédica, cosmética y recientemente en el tratamiento de aguas gracias a su gran cantidad de grupos amino dentro cadenas poliméricas que pueden interactuar con moléculas de carga negativa tales como proteínas y algunos tipos de sólidos.

Existen principalmente dos tipos de quitosanos; los solubles en agua y los solubles en ácido, los solubles en agua son disueltos en un medio que no presentan algún tipo de ácido, los cuales son utilizados en productos donde las condiciones ácidas no son favorables, tales como en algunos medicamentos, cosméticos y alimentos. La solubilidad depende de distintos factores, tales como peso molecular, pH, temperatura

y grado de su grado de acetilación y peso molecular, siendo los tipos de quitosano con mayor peso molecular solo solubles en medios acuosos ácidos).

2.4 Técnicas de caracterización de hidrogeles

2.4.1 FTIR

El Infrarrojo por Transformada de Fourier es una técnica analítica que aplica radiación infrarroja (IR) a muestras, para que luego la radiación IR impacte en las vibraciones atómicas de las moléculas dentro de la muestra, resultando en una absorbancia específica y/o la transmisión de energía, esto permite al FTIR determinar vibraciones moleculares específicas dentro de la muestra, tales como componentes orgánicos, enlaces químicos y contenido químico (proteínas, carbohidratos y lípidos) [17]

2.4.2 TGA (análisis termogravimétrico)

Esta técnica mide los cambios de peso al aumentar de forma lineal de la temperatura en relación con el tiempo [18]. Se puede utilizar la técnica de TGA para obtener datos acerca de la; fusión, vaporización, sublimación, absorción, adsorción, desolvación (especialmente la deshidratación), descomposición y degradación oxidativa. Los resultados de un TGA se pueden presentar de la siguiente manera:

A) Peso en relación con la curva de temperatura, también conocida como la curva termogravimétrica,

B) Rango de pérdida de peso en relación con la curva de temperatura, también conocida como la curva termogravimétrica diferencial, dichos datos obtenidos se pueden presentar como una escala del peso verdadero, como un porcentaje del peso total o como un porcentaje del peso total perdido representado como una fracción.

III. ANTECEDENTES

3.1 Hidrogeles a base de polisacáridos empleados en agricultura.

En la literatura se ha reportado muy recientemente el estudio de hidrogeles a base de polisacáridos para su uso en agricultura, particularmente para aumentar el rendimiento en cultivos de maíz. A continuación, se muestran los reportes investigados en este trabajo.

Dentro de los primeros reportes se encuentra el trabajo hecho por Ibrahim y col. (2015) quien elaboró un hidrogel a base de desechos agrícolas de la cosecha de arroz aprovechando principalmente a la lignina residual [19]. El hidrogel sintetizado se comparó en una prueba de campo en maíz en suelos afectados por salinidad utilizando a un hidrogel comercial y una prueba sin hidrogel como referencia. En los resultados, se pudieron observar que ambos hidrogeles tuvieron un aumento considerablemente la concentración de nutrientes y en la toma de agua en comparación a la prueba sin hidrogeles.

Al año siguiente Chen y col. (2016) estudiaron el efecto que tienen los polímeros superabsorbentes sobre plantas de maíz, por lo cual se evaluó la germinación de las semillas, cultivos en macetas, experimentos hidropónicos y la degradación de los polímeros para evaluar las características y mecanismos relacionadas con la aplicación de los polímeros [20]. Los estudios demostraron que la aplicación de los hidrogeles inhibió el crecimiento del maíz y que alteraron la morfología de las raíces, causando un arreglo irregular y sueltos de las células y un rompimiento de la corteza del parénquima, siendo estos efectos más pronunciados a mayores concentraciones del polímero.

Posteriormente, Elbarbary y col. (2017), prepararon hidrogeles superabsorbentes de poliacrilamida con alginato y/o quitosano mediante el uso de radiación gamma [21]. Los hidrogeles sintetizados mostraron una capacidad alta de retención de agua y mostraron un efecto promotor del crecimiento y la calidad y cantidad de plantas de maíz. Las plantas tratadas con los hidrogeles de poliacrilamida con alginato mostraron un aumento del 50 % en el rendimiento de grano, lo que sugiere su posible uso como acondicionador de suelo y como reserva de agua para el sistema planta-suelo. Ese mismo año Chen y col. (2017) estudiaron los efectos de los hidrogeles sobre los cultivos de maíz en condiciones ahorradoras de agua, se sembraron semillas de maíz con agua destilada y tres diferentes hidrogeles: poliacrilato de sodio, poliacrilato de potasio y poliacrilato de sodio impregnado con polvo de piedra de fósforo.[22] Los resultados mostraron que se presentaban efectos negativos cuando se aplicaban poliacrilato de sodio y poliacrilato de potasio, mientras que el poliacrilato de sodio con polvo de piedra de fósforo ayudó con el crecimiento vegetal sin causar daños en el crecimiento de las raíces.

Algunos años después, Mazloom y col. (2020) estudiaron el efecto de hidrogeles a base de lignina en la disponibilidad de agua en el suelo para el maíz cultivado en condiciones de sequía [23]. Ellos observaron que las plantas de maíz sembradas en suelos tratados con estos hidrogeles mostraron un mayor crecimiento, biomasa y contenido de fósforo.

En 2021, Yang y col. sintetizaron hidrogeles a base de quitosano y alginato mediante el método de inclusión física y reticulación iónica los cuales fueron cargados con clorantraniliprol (CLAP) [24]. Estos hidrogeles fueron preparados para controlar el daño ocasionado por *Spodoptera frugiperda* en las mazorcas de maíz. Ellos encontraron

que los hidrogeles cargados con este insecticida mejoraron significativamente la eficiencia de transferencia del plaguicida de una manera segura.

Un año más tarde, Yang y col. (2022) prepararon un hidrogel superabsorbente (basado en acrilato y acrilamida) cargado con ácido fúlvico para estudiar su efecto en el crecimiento de raíz y tallo de plantas de maíz [25]. Los resultados mostraron que los diámetros promedio de las raíces aumentaron significativamente en los tratamientos con este hidrogel en combinación con el ácido fúlvico en comparación con el control (tratamiento sin hidrogel). Ese mismo año Watcharamul y col. (2022) evaluaron la influencia un hidrogel compuesto carboximetilcelulosa/nanocarbonato de calcio sobre el crecimiento del maíz en un experimento en macetas [26]. Los resultados mostraron que la biomasa y la longitud radicales acumuladas del maíz cultivado en el suelo enmendado con hidrogeles fueron significativamente menores que las del suelo no tratado.

Posteriormente, Ghobashy y col. (2023) reportaron la preparación de un hidrogel ultra absorbente basado en hidroxietil celulosa y acrilamida mediante el método de irradiación gamma el cual fue empleado para estudiar la liberación controlada de urea y estudiar su efecto en el crecimiento de plántulas de maíz [27]. Los resultados mostraron que estos hidrogeles tuvieron la capacidad de retener agua durante 28 días mejorando el crecimiento de *Zea mays L.* en niveles de estrés hídrico (0-100 %) además de un aumento en la longitud del tallo y un incremento en el contenido de clorofila y carotenoides en las hojas de la planta de maíz en comparación con la muestra de control.

Recientemente, Moghaddam y col. (2024) sintetizaron hidrogeles a base de goma de xantana y gelatina usando irradiación con electrones los cuales fueron cargados con ácido fúlvico [28]. Ellos investigaron el efecto de la dosis de irradiación sobre las propiedades mecánicas, porcentaje de gel e hinchamiento. Los resultados mostraron una mejora significativa en el crecimiento del maíz forrajero tratado con estos hidrogeles en medios de cultivo de invernadero.

Por su parte, Lv y col. (2024) sintetizaron un hidrogel a base de carbamato de almidón (SC) modificado con alginato de sodio mediante el método de reticulación con iones catiónicos [29]. Estos hidrogeles se emplearon como sistemas de liberación lenta del fertilizante urea. Los resultados mostraron que la liberación lenta de urea contenida en los hidrogeles promovió el crecimiento de las plántulas de maíz.

Ese mismo año, Lima-Tenório (2024) encapsuló bacterias promotoras de crecimiento vegetal con hidrogeles a base de goma arábica para remplazar a los fertilizantes minerales y agroquímicos con hidrogeles que contienen bacterias que pueden producir fitohormonas y amonio del nitrógeno ambiental [30]. Para realizar el experimento se le aplicó a semillas de maíz un hidrogel a base de goma arábica que contenía la bacteria *A. Brasilense*. Los resultados demostraron un aumento del 20% en el área y volumen de las raíces y un aumento del 60% de crecimiento del tallo y del peso fresco cuando se aplicaba el hidrogel inoculado en comparación de cuando se aplicaba el hidrogel sin inocular.

Adicionalmente, Channab y col (2024) prepararon películas basadas en una mezcla de almidón (ST) y lignina con nanopartículas de óxido de grafeno (GO), para usarlo como

recubrimiento de un fertilizante a base de fósforo para estudiar su efecto en el crecimiento de plantas de maíz [31]. Las formulaciones garantizaron una liberación gradual de fósforo demostrando potencial para una gestión eficiente de nutrientes en entornos agrícolas. El estudio demostró que los fertilizantes recubiertos tuvieron un efecto positivo en diversos parámetros de crecimiento del maíz (*Zea mays L.*). Las plantas de maíz tratadas con fertilizantes recubiertos mostraron un aumento del 22.9 % en la biomasa radicular en comparación con las plantas tratadas con el fertilizante sin recubrir.

Más recientemente, Zhang y col. (2025) prepararon un hidrogel de quitosano con la arcilla laponita para su uso como agente de liberación de un pesticida en cultivos de maíz contra algunos patógenos como *Dioscorea batatas*, *Setosphaeria turcica* (un patógeno clave del maíz) y *Botrytis cinerea* (un patógeno clave de la enfermedad del moho gris [32]). Los resultados mostraron que estos hidrogeles encapsularon eficazmente los reguladores del crecimiento vegetal dentro de su estructura de red tridimensional, demostrando una impresionante regulación del crecimiento vegetal y capacidades antifúngicas sinérgicas sin dañar las células normales.

Por su parte El Idrissi y col. (2025) sintetizaron hidrogeles de redes semi-interpenetrantes de almidón carboximetilado con ácido poli acrílico para uso como regulador de la humedad y liberación controlada de fertilizante [33]. Los resultados mostraron que este hidrogel mejoró parámetros clave de crecimiento, incluyendo el número de hojas, el contenido de clorofila, el diámetro del tallo, la biomasa fresca y seca, y la absorción de nutrientes bajo estrés hídrico.

En base a estos antecedentes, en este trabajo se planteó la preparación de un hidrogel supe absorbente de origen natural a base de quitosano y maltodextrina sintetizado mediante copolimerización vía radicales libres para estudiar su efecto sobre varios parámetros de crecimiento vegetal (germinación, altura de plúmula, longitud de raíz y biomasa) en plántulas de maíz de la variedad ratón.

IV. JUSTIFICACIÓN E HIPÓTESIS

La aplicación de hidrogeles dentro del campo agrícola ha tenido un aumento en tendencia en los últimos años, especialmente en las zonas áridas y semi-áridas donde la recolección y uso del agua es limitado. Motivo por el cual se ha ido aumentando el uso de hidrogeles, ya que estos han demostrado una gran capacidad de retención de agua, nutrientes e incluso hasta tratamientos en la zona de radícula de la planta lo cual disminuye de manera significativa el riego y la aplicación de tratamientos en los cultivos. Por lo tanto, en este trabajo el hidrogel de maltodextrina con quitosano sintetizado pudiera proveer una solución a esta problemática para cultivos afectados por estrés hídrico, como es el caso del maíz.

La hipótesis de este trabajo es que es posible la preparación de hidrogeles a base de maltodextrina y quitosano mediante polimerización vía radicales libres, los cuales tendrán un efecto positivo en la germinación de semillas de maíz y crecimiento vegetal y al mismo tiempo sirviendo como reservorios de agua para reducir su frecuencia de riego bajo condiciones de laboratorio.

V. OBJETIVOS

5.1 Objetivo general

Sintetizar y caracterizar hidrogeles a base de maltodextrina y quitosano mediante polimerización por vía radicales libres y evaluar su efecto sobre la germinación y desarrollo de plántulas de maíz.

5.2 Objetivos específicos

- 1) Modificar maltodextrina (MD) y quitosano con metacrilato de glicidilo (GMA) y anhídrido maleico, respectivamente, para proveerles de grupos susceptibles a polimerizar por radicales libres.
- 2) Sintetizar hidrogeles a base de maltodextrina y quitosano mediante polimerización por vía radicales libres variando la concentración del agente entrecruzante N,N,-metilenebiscarilamida (NMBA).
- 3) Caracterizar los hidrogeles sintetizados mediante espectroscopía de infrarroja (FT-IR), análisis termogravimétrico y pruebas de hinchamiento.
- 4) Estudiar el efecto de estos hidrogeles en la germinación y desarrollo de semillas de maíz (altura de plúmula, longitud de raíz y biomasa).

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó dentro de las instalaciones del Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA) dentro del Departamento de Procesos de Polimerización, Planta Piloto 2/Laboratorio B

6.1 Modificación de Maltodextrina (MD) con metacrilato de glicidilo (GMA)

Se disolvieron 4g de MD en 10 mL de agua desionizada para después agregar una solución de HCL con una molaridad de 1.6 gota a gota hasta que se alcanzara un pH aproximado de 3. Luego se le agregó a la solución 8g de GMA para después dejarse en agitación por 24 h a 60 °C. Finalmente la solución de MD-GMA se obtuvo mediante la precipitación en etanol, para después centrifugarse y dejarse en la estufa de secado a 60 °C por 24 horas.

6.2 Modificación de quitosano (CS) con anhídrido maléico (MA).

Se disolvieron 2g de CS en 66 mL de agua destilada y 0.6 mL de ácido acético, posteriormente se le agregó una solución compuesta por 4g de AM disueltos en 4mL de acetona, agregándose gota por gota en la solución de CS para después dejarse en agitación por 24 horas. Una vez terminado las 24 horas de agitación, el producto se precipitó en 200 mL de acetona, donde se decantó y se dejó secar en una estufa de secado a vacío por 7 horas. Al finalizar el proceso de secado se envolvió el producto final en aluminio para evitar la entrada de luz en el contenedor.

6.3 Síntesis del hidrogel poli (Maltodextrina-co-quitosano) (MD-co-CS)

En un matraz bola se disolvieron 2 g de CS-AM en un volumen de 40 mL de agua desionizada. Una vez disuelto, se añadieron 2g de MD-GMA hasta su disolución total. Entonces, se agregó como agente entrecruzante N,N´metilen-bis acrilamida (NMBA) a concentraciones de 0, 1 y 2.5% y se utilizó como iniciador persulfato de amonio (APS) a una concentración del 5% en peso con respecto a la cantidad de co-monomeros. El matraz fue después sellado con parafilm y fue desgasificado con nitrógeno durante 20 minutos para ser colocado en un baño de temperatura controlada a 60 °C y en agitación constante por una hora hasta la formación del hidrogel.

Después se dejó al hidrogel dentro de agua destilada por 20 minutos en agitación baja. Posteriormente, se reemplazó el agua destilada y se repitió este paso hasta cumplir tres repeticiones para eliminar residuos de monómeros sin reaccionar. Finalmente, el hidrogel se congeló y se secó mediante liofilización.

6.4 Evaluación del efecto del hidrogel sobre el crecimiento y desarrollo de plántulas de maíz.

6.4.1 Preparación de soluciones de la mezcla física MD-CS.

Primeramente, se preparó un litro de una solución acuosa acidulada con 0.5 % de ácido acético conteniendo los polisacáridos MD y CS en una proporción en peso de 1:1. Estas soluciones se prepararon a diferentes concentraciones: 50, 100, 150, 200 y 300 ppm.

6.4.2 Preparación de dispersiones del hidrogel poli (MD-co-CS).

Se preparó una solución acuosa de ácido acético al 0.5 %. Posteriormente, se agregó el hidrogel correspondiente de poli (MD-co-CS) para obtener concentraciones de 50, 100, 150, 200 y 300 ppm.

6.4.3 Evaluación de crecimiento vegetal

Esta prueba se realizó con el fin de encontrar una óptima concentración que estimule el proceso de germinación, mostrando los mejores resultados agronómicos y fisiológicos de las plántulas de maíz.

a) Preparación de pruebas de germinación

El método empleado para realizar las pruebas de germinación es el protocolo establecido por la Asociación internacional para análisis de semillas (ISTA 2004).

b) Localización del sitio experimental

El experimento se realizó en el laboratorio de Agrotecnología y Biotecnología del Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), en Saltillo, Coahuila, México

c) Procedimiento de siembra de maíz usando mezclas una mezcla física de CS y MD.

Se realizó una serie de pruebas en la germinación de semillas de maíz con mezclas físicas de los polímeros CS y MD en diferentes concentraciones para evaluar sus efectos. Se establecieron cuatro concentraciones diferentes 50, 100, 200 y 300 ppm empleando una relación MD:CS de 1:1 en peso. Se usaron 25 semillas para poder tener un total de 100 semillas como muestra para cada tratamiento (el experimento se llevó a cabo cuatro

veces). Entonces, las semillas se sumergieron en la solución de polisacáridos correspondiente bajo agitación a 90 rpm, durante 18 h.

Una vez transcurrido este tiempo, se realizó el proceso de siembra, el cual se hizo mediante la colocación de 25 semillas por repetición sobre papel Anchor previamente humedecido con agua destilada en una línea uniforme a lo largo del papel para después cubrir a las semillas con otra hoja de papel anchor humedecida. La hoja después se enrolló en forma de taco para luego acomodarse junto con las otras repeticiones en una bolsa de plástico de polietileno y finalmente colocarse dentro de una incubadora Thermo Scientific a 25 °C.

Al paso de cuatro días, se checo el promedio de semillas germinadas. Al término del séptimo día de tratamiento, se midieron los parámetros de crecimiento de plúmula y de raíz y se determinó su peso fresco. Para esto, se separaron las plántulas por tratamiento y se pesaron agrupadas por repetición (25 plántulas) para así evitar el pesar cada plántula individualmente. Posteriormente, se sumaron los pesos de las cuatro repeticiones para obtener un promedio del peso de las plántulas por tratamiento.

Cabe mencionar que estos tratamientos se regaron a diario para mantener la humedad en el taco.

Después de haber realizado la evaluación del peso fresco de las plántulas, las plántulas fueron colocadas dentro de bolsas de papel estraza para luego ser llevadas hacia un horno de secado donde fueron dejadas a secar por una semana a una temperatura de 60 °C. Una vez terminado el periodo de secado se llevaron a pesar en una balanza analítica donde fueron anotados sus pesos y obtenido un promedio de peso por

tratamiento. La tabla siguiente muestra los tratamientos llevados a cabo en este experimento (Tabla 1).

Tabla 1. Descripción de los tratamientos llevados a cabo en semillas de maíz tratadas con una mezcla física de MD-CS a diferente concentración.

Tratamiento 1	Agua destilada
Tratamiento 2	MD-CS 50ppm
Tratamiento 3	MD-CS 100ppm
Tratamiento 4	MD-CS 200ppm
Tratamiento 5	MD-CS 300ppm

d) Procedimiento de siembra de maíz usando el hidrogel de poli (MD-co CS) con diferente porcentaje de NMBA.

Se prepararon soluciones de los diferentes hidrogeles de poli (MD-co-CS) en una solución acuosa conteniendo 0.5% (p/p) de ácido en acético con distintas concentraciones de NMBA (0, 1 y 2.5%). Estas soluciones se preparan a diferente concentración del hidrogel (50, 100, 200 y 300 ppm).

Previamente, la muestra de hidrogel seco se sometió a un proceso de molienda para obtener partículas con un menor tamaño para poder facilitar su dispersión en la solución. Entonces, las semillas de maíz se trataron con estas dispersiones de hidrogel como se describió previamente en la sección anterior. La siguiente tabla muestra los diferentes tratamientos llevados a cabo con estas muestras de hidrogel.

Tabla 2. Descripción de los tratamientos llevados a cabo en muestra de maíz con hidrogeles poli(MD-co-CS) sintetizados con distintas cantidades de NMBA (0, 1, y 2.5%).

Tratamiento 1	Agua destilada
Tratamiento 2	Hidrogel con 0% de NMBA a 50 ppm
Tratamiento 3	Hidrogel con 0% de NMBA a 100 ppm
Tratamiento 4	Hidrogel con 0% de NMBA a 200 ppm
Tratamiento 5	Hidrogel con 0% de NMBA a 300 ppm
Tratamiento 6	Hidrogel con 1% de NMBA a 50 ppm
Tratamiento 7	Hidrogel con 1% de NMBA a 100 ppm
Tratamiento 8	Hidrogel con 1% de NMBA a 200 ppm
Tratamiento 9	Hidrogel con 1% de NMBA a 300 ppm
Tratamiento 10	Hidrogel con 2.5% de NMBA a 50 ppm
Tratamiento 11	Hidrogel con 2.5% de NMBA a 100ppm
Tratamiento 12	Hidrogel con 2.5% de NMBA a 200ppm
Tratamiento 13	Hidrogel con 2.5% de NMBA a 300ppm

VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Modificación de MD con GMA.

La modificación de MD con GMA fue comprobada mediante FT-IR (Figura 1). En esta figura, el espectro de FTIR de la MD mostró una señal en 3586 y 3053cm^{-1} , perteneciente a las vibraciones de estiramiento de los enlaces de los grupos hidroxilo (O-H) y una banda de tensión alrededor de los 2847 y 2973cm^{-1} , la cual corresponde a los enlaces C-H. También se mostró la presencia de bandas entre 1634 y 1361cm^{-1} , las cuales indicaron la presencia de enlaces C-OH. Además de vibraciones en 1447 y 1388cm^{-1} las cuales se atribuyen a vibraciones de tijera del CH_2 y las señales intensas encontradas en 1154 , 1094 y 1042cm^{-1} se relacionan a los enlaces glucosídicos C-O-C. La funcionalización de la MD con GMA se demostró mediante la banda adicional observada en 1714cm^{-1} los cuales corresponden al grupo carboxilo ($\text{C}=\text{O}$) del GMA en el espectro de la muestra MD-GMA [34].

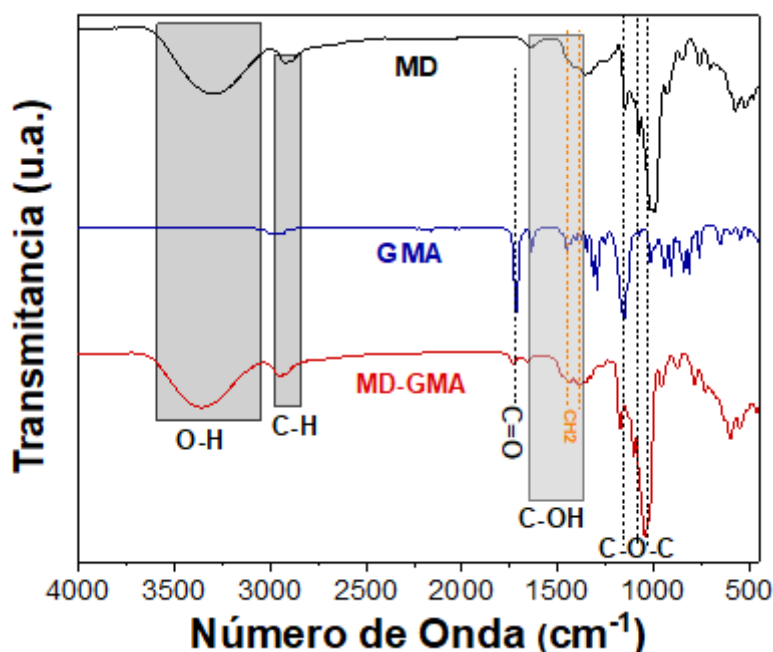


Figura 1. Espectros de FTIR de MD, GMA y MD-GMA.

7.2 Modificación de CS con AM

La modificación del CS con MA se realiza mediante la reacción del grupo amino del CS con el grupo carbonilo del MAA, este grupo carbonilo se rompe y realiza una reacción de amidación. Al modificar CS con MA, este le provee de grupos susceptibles para reaccionar mediante polimerización de radicales libres (CH=CH). Estos reaccionaran con las moléculas MD-g-GMA y NMBA, para obtener el hidrogel de poli (MD-co-CS). La modificación del CS con AM se pudo observar mediante el análisis de los espectros de FTIR (Figura 2).

El espectro de CS mostró una banda en 3663 a 3028 cm^{-1} indicativo de la presencia de grupos O-H y N-H, mientras que la banda de 2969 y 2853 cm^{-1} corresponde a una banda de vibración de estiramiento de un enlace alifático C-H. También se observaron señales de vibración de estiramiento indicando la presencia de grupos carbonilos de amida (amida I) en 1616 cm^{-1} , flexión N-H a 1531 cm^{-1} (amida II) y estiramiento N-H/C-N en 1369 cm^{-1} (amida III). Además, se muestran picos intensos en los puntos 1032, 1051 y a 1149 cm^{-1} , que indicaron la presencia de enlaces C-O-C y C-O de las unidades de D-glucosa [35, 36].

Por otro lado, el espectro de CS-MA presenta las señales típicas del CS prístino, sin embargo, se observó una disminución de intensidad en la señal de amida II, un desplazamiento de la banda de amida I a 1669 cm^{-1} así como la presencia de una nueva banda en 1777 cm^{-1} debido a la presencia del grupo ácido carboxílico proveniente del MA. La presencia de estas señales confirmó la modificación del CS con MA.

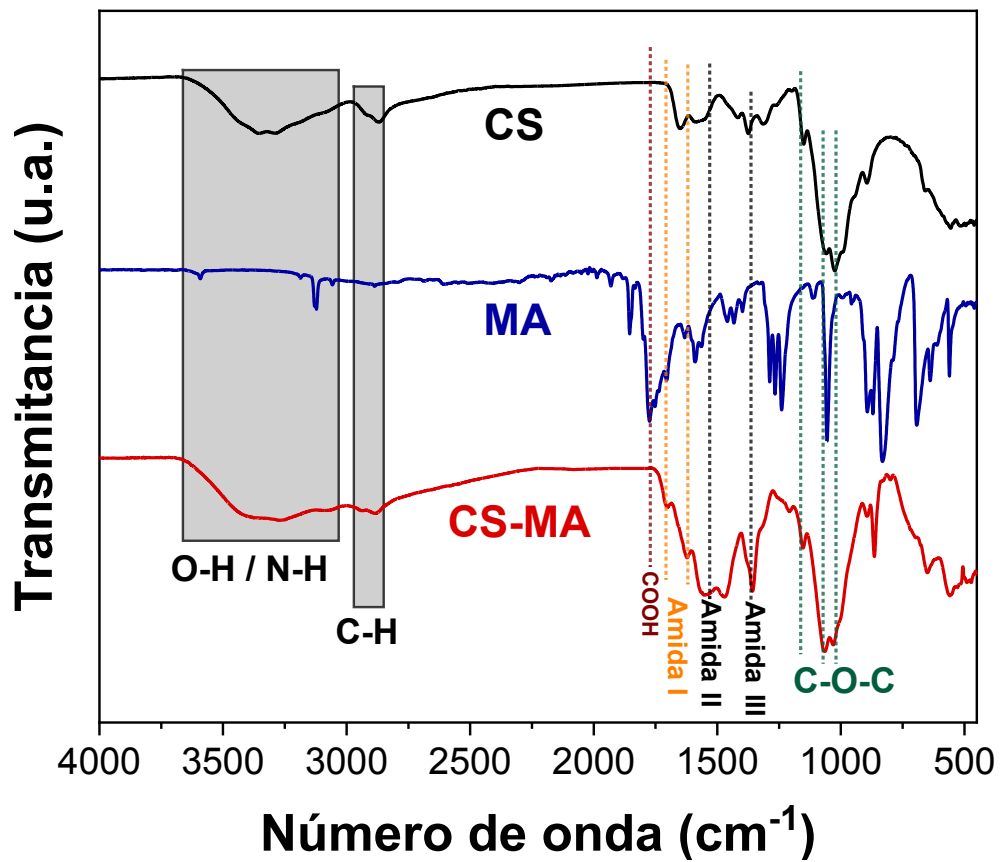


Figura 2. Espectros de FT-IR del CS, MA y CS-MA.

7.3 Síntesis de hidrogeles de poli (MD-co-CS)

7.3.1 Espectroscopía de Infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR)

Los hidrogeles fueron sintetizados con una relación de CS:MD a 1:1 a diferentes concentraciones de agente entrecruzante. Los espectros de estos hidrogeles son mostrados en la figura 3.

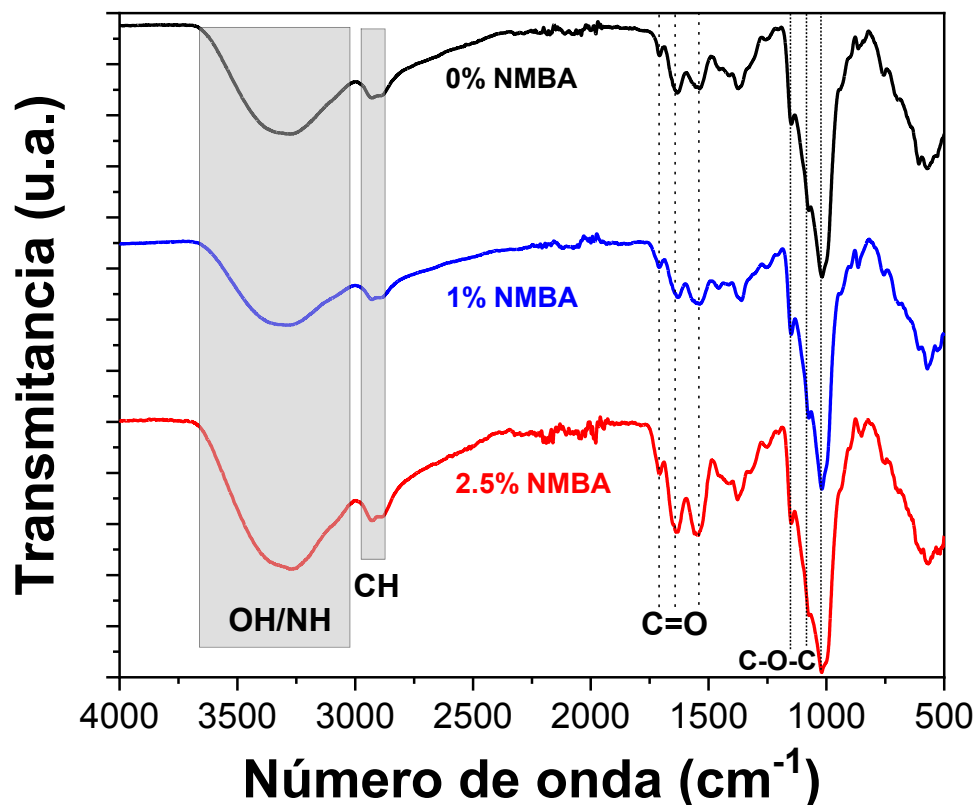


Figura 3. Espectros de FT-IR de los hidrogeles sintetizados con diferente concentración de NMBA.

En esta figura se puede observar que los hidrogeles presentaron bandas de vibración características sus componentes (MD-GMA y N-maleilquitosano), las cuales indican la formación del copolimero. Se pueden observar las vibraciones de los grupos hidroxilos que están presentes en MD-GMA y los grupos O-H/N-H del N-maleilquitosano en el rango de 3028 a 3660 cm^{-1} , así como bandas de las vibraciones C-H alrededor de 2966 y 2873 cm^{-1} . Además, se observan bandas en 1152, 1084 y 1023 cm^{-1} relacionadas con los enlaces glicosídicos C-O-C de MD y CS. También, se pueden observar bandas en 1709, 1642 y 1539 cm^{-1} correspondiente los grupos C=O, grupos amida y enlace N-H presentes en MD-GMA y CS-MA, respectivamente. Por último, la figura muestra que

al incrementar el % de NMBA, aumenta la intensidad de estas señales, lo cual puede indicar que existe un mayor entrecruzamiento de las cadenas poliméricas al incrementar el contenido de agente entrecruzante.

7.3.2 Análisis termo gravimétrico (TGA).

También se realizó una prueba de TGA para analizar la estabilidad térmica de los hidrogeles sintetizados (Figura 4). De esta figura, se pudo observar que la muestra de MD-GMA fue la que presentó mayor estabilidad. Esta muestra mostró a perder peso a partir de una temperatura superior a los 300 °C lo cual fue debido a debido a la descomposición de las unidades D-glucosa [37].

Por su parte, la curva de TGA de CS-MA mostró tres etapas de pérdida de peso: primeramente, se observó una pérdida en peso alrededor de 25 a 120 °C debido a moléculas de agua físicamente adsorbidas. Posteriormente se observa una pérdida en el rango de 140 a 240 °C debida a la descomposición de los grupos ácidos carboxílicos provenientes del MA injertado en CS. Por último, se observó una pérdida entre 300 y 500 °C debido a la descomposición de la cadena principal de la estructura del CS (grupos glucosídicos) [38, 39].

Por otro lado, los termogramas de los hidrogeles sintetizados con diferente contenido de NMBA no mostraron diferencias significativas entre ellos. Se puede apreciar que estos hidrogeles presentaron una pérdida en el rango de 25-120 °C debida a la evaporación de moléculas de agua así como una disminución de su peso observada en el rango de 200 a 350 °C debida a la pérdida de los grupos glucosídicos presentes en

MD-GMA y CS-MA. Por último, se puede observar que el hidrogel sin NMBA mostró una ligera menor estabilidad térmica que los hidrogeles conteniendo 1 y 2.5 %.

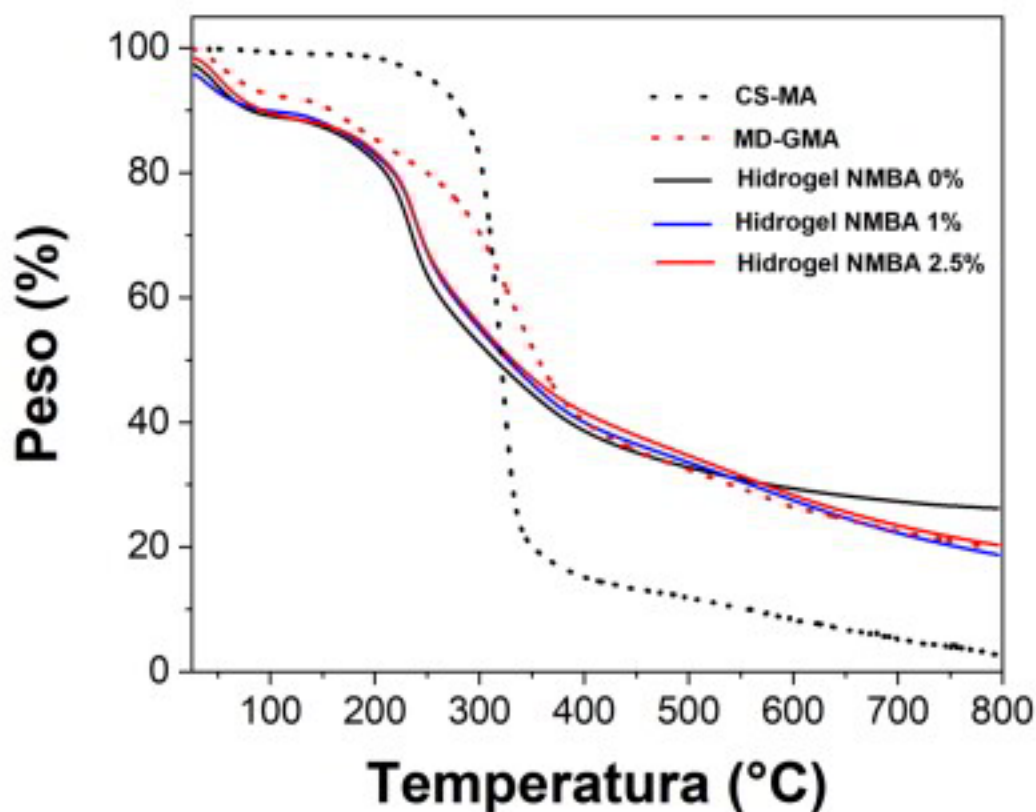


Figura 4. Curvas de TGA de MD-GMA, CS-MA y poli (MD-co-CS) sintetizado con diferente % de NMBA: a) 0, b) 1, y c) 2.5 %.

7.3.3 Pruebas de hinchamiento.

Las pruebas de hinchamiento del hidrogel sintetizado sin NMBA, mostró el mayor hinchamiento con respecto a las demás muestras, observándose inicialmente un hinchamiento de hasta el 1800 % (Figura 5). Sin embargo, el hinchamiento se ve reducido con el paso del tiempo, ya que esta muestra se fue aparentemente disolviendo

durante el experimento. Este comportamiento se debe a que el polímero sintetizado no se retículo y por lo tanto pudo disolverse en el agua.

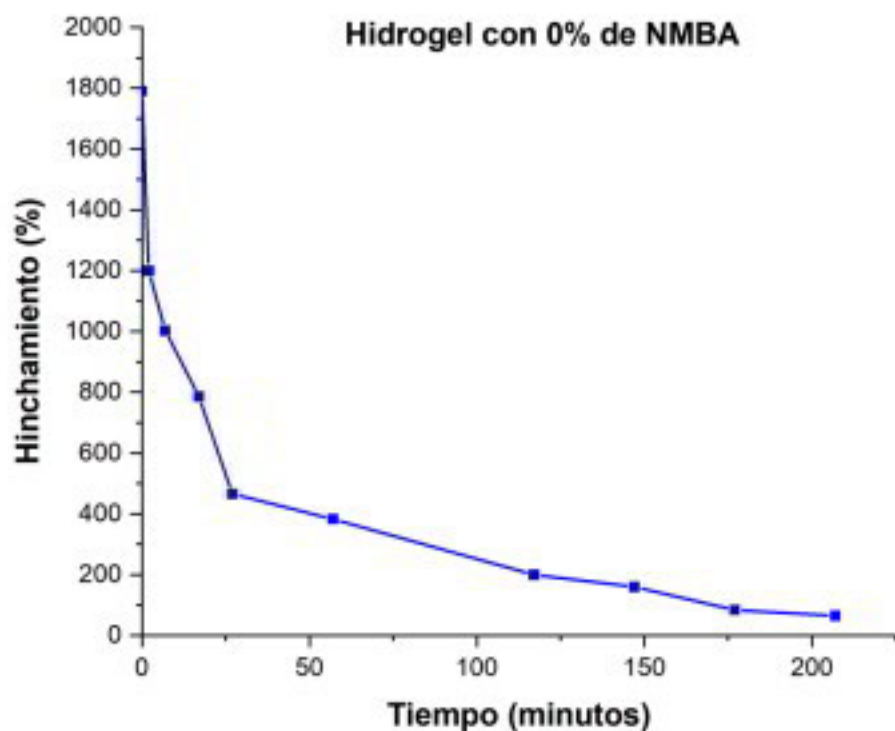


Figura 5. Prueba de hinchamiento realizada a un hidrogel poli(MD-co-CS) sintetizado con una concentración del 0% de NMBA

Por otro lado, los hidrogeles sintetizados con 1 y 2.5 % de NMBA, mostraron valores de hinchamiento estables alrededor de 900 y 600 %, respectivamente (Figuras 6 y 7). Estos valores sugieren que al agregar mayor contenido de agente entrecruzante, la red de los hidrogeles tuvo mayor grado de reticulación lo cual afecta el contenido de agua que pueden almacenar en su estructura. A mayor grado de entrecruzamiento, menor capacidad para retener moléculas de agua.

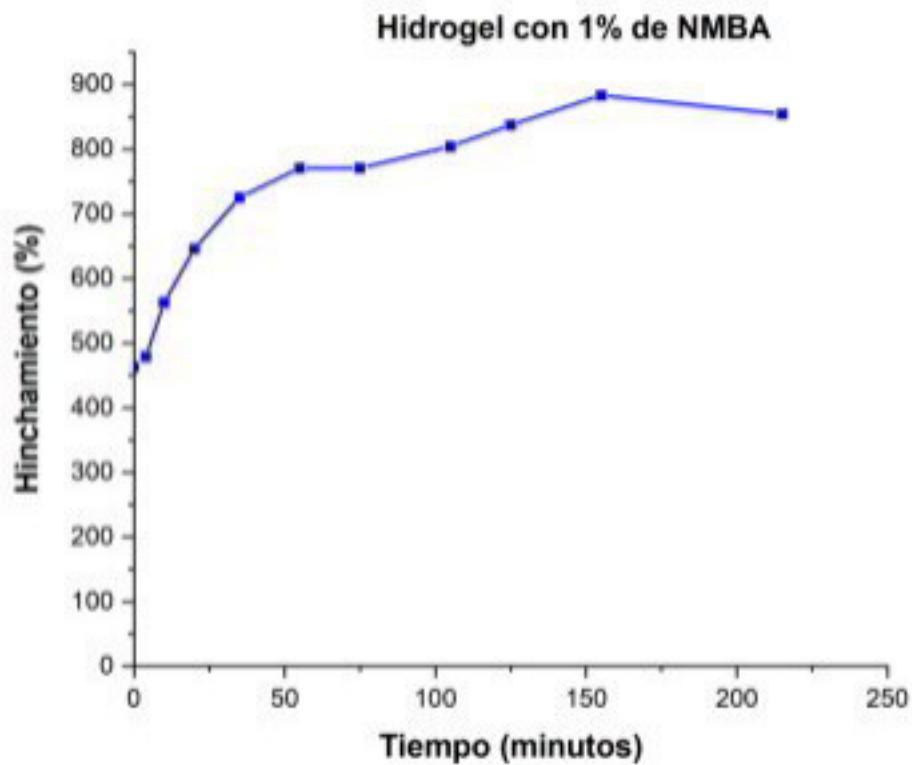


Figura 6. Prueba de hinchamiento realizada a un hidrogel poli(MD-co-CS) sintetizado con una concentración de 1% de NMBA.

Particularmente, el hidrogel sintetizado con 2.5% de agente entrecruzante mostró una reducción del hinchamiento conforme paso el tiempo. Este comportamiento pudiera deberse a que, en algunos casos, ciertos hidrogeles experimentan una pérdida de agua debido al balance osmótico, el cual está relacionado con el balance de las cargas (positivas y negativas) que interactúan con estas moléculas.

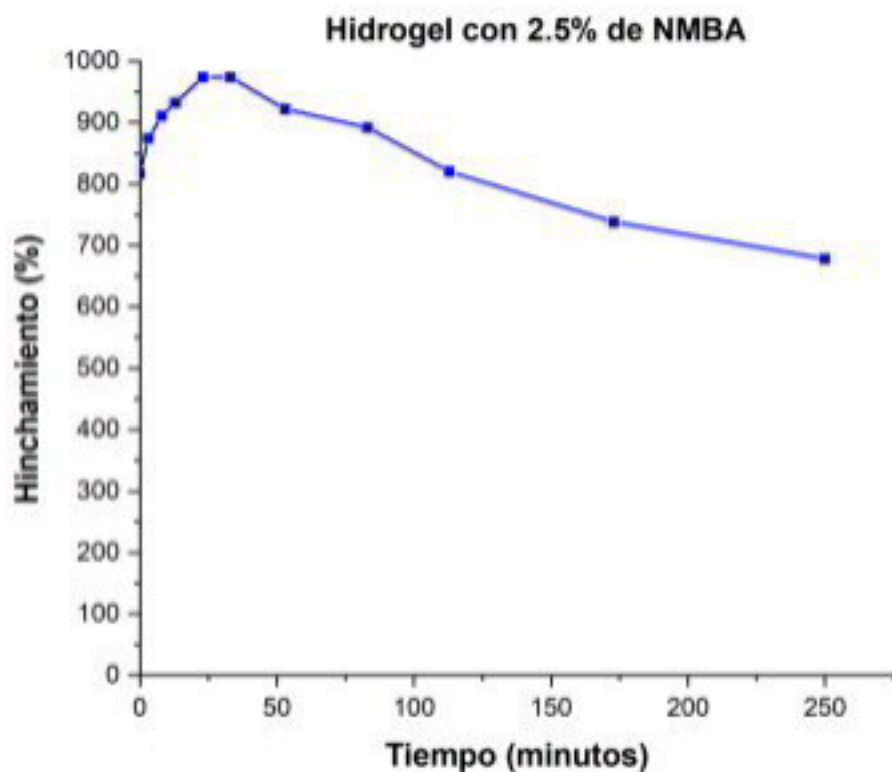


Figura 7. Valores de hinchamiento para las muestra de hidrogel de poli(MD-co-CS) sintetizado con 2.5 % de NMBA.

7.4 Evaluación del efecto de mezcla física de polisacáridos sobre el porcentaje de germinación y crecimiento vegetal.

Al terminar el experimento del tratamiento de semillas de maíz con una solución acuosa de mezcla física de MD y CS se determinaron, el porcentaje de germinación, longitud promedio de plúmula y radícula así como la determinación del peso fresco y seco de la plántula para determinar su porcentaje de agua. Estos resultados son mostrados en la Tabla 3 y figura 8.

7.4.1 Determinación del porcentaje de germinación

El porcentaje de germinación de la semilla que es una característica de gran importancia representa la velocidad y uniformidad de la germinación, el crecimiento de las plántulas y la capacidad de germinar después de haberse almacenado la semilla.

Cuatro días después de haber realizado la siembra, se realizó el primer conteo para evaluar las plántulas germinadas, para conocer su potencial biológico bajo condiciones favorables de la luz, humedad y temperatura. Los resultados mostraron que al aumentar la concentración de los polisacáridos de 50 a 300 ppm, el porcentaje disminuyó. Esto pudiera deberse a una probable toxicidad provocada por estos polisacáridos.

7.4.2 Efecto sobre el crecimiento de altura de plúmula y longitud de radícula.

Al cumplirse siete días se realizó la medición de los parámetros de crecimiento de la altura de la plúmula y longitud de radícula. Los resultados observados mostraron que al incrementar la concentración de los polisacáridos hubo una disminución del crecimiento vegetal con respecto al testigo. Es decir, el tratamiento mostró un efecto inhibidor de crecimiento. Esto pudiera deberse a un posible efecto de citotoxicidad por parte de esta mezcla de polisacáridos sobre la plántula.

Tabla 3. Resultados obtenidos de la medición de germinación, crecimiento vegetal y contenido de agua de las semillas de maíz tratadas con una mezcla de MD-CS a diferente concentración.

<i>Tratamiento</i>	<i>Germinación</i>	<i>Raíz</i>	<i>Plúmula</i>	<i>Peso fresco</i>	<i>Peso seco</i>	<i>Agua</i>
	(%)	(cm)	(cm)	(g)	(g)	(%)
T1 Agua destilada	98	28.76 (±4.93)	13.31 (±2.53)	31 (±1.35)	7.21 (±0.36)	76.74
T2 MD-CS 50PPM	90	22.58 (±8.82)	8.41 (± 3.93)	26.27 (±0.94)	7.4 (±0.34)	64.46
T3 MD-CS 100PPM	81	21.25 (±11.47)	8.45 (± 5.05)	28.67 (±1.63)	8.31 (±0.36)	71.01
T4 MD-CS-200PPM	88	24.84 (±9.1)	7.76 (± 3.85)	25.2 (±0.42)	8.2 (±0.08)	67.46
T5 MD-Q 300PPM	74	17.961 (±11.17)	7.83 (± 5.31)	24.79 (±0.72)	7.74 (±0.25)	68.77

7.4.3 Determinación de porcentaje de agua

El porcentaje de agua presente en una muestra es importante para determinar si el peso total de una plántula está conformado en su mayoría por biomasa vegetal o si se encuentra conformada principalmente por agua, lo que significaría que no hubo un desarrollo adecuado de los tejidos vegetales, lo que afectaría su crecimiento, desarrollo y fisiología. Además esto afectaría de manera indirecta su contenido nutrimental. Los resultados mostraron que no hubo un cambio significativo en el porcentaje de agua para las muestras tratadas con la mezcla física de polisacáridos con respecto al control. Sin

embargo, se puede apreciar que el peso seco de las muestras tratadas con los polisacáridos fue mayores con respecto al testigo. Estos resultados pueden indicar una deshidratación de los tejidos, motivo por el cual, aunque fue mayor el peso seco de las plántulas al aumentar la concentración de los polisacáridos, el peso fresco y el crecimiento de las plántulas tanto en la raíz como en el tallo fueron menores.

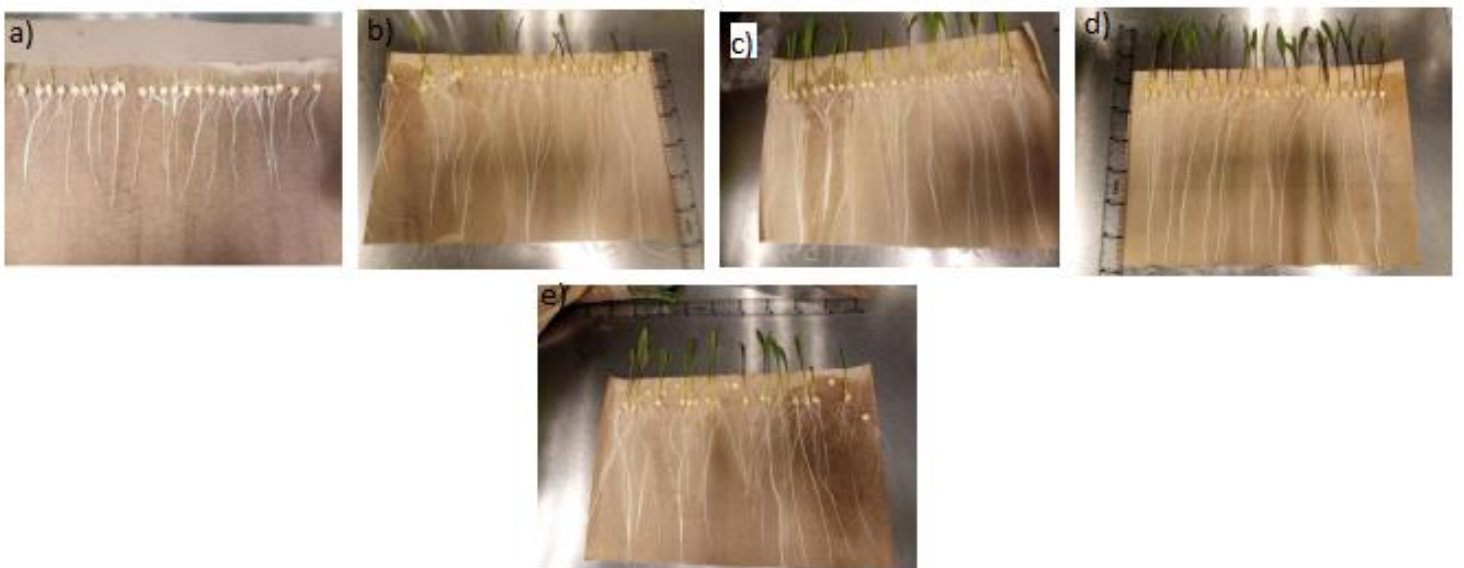


Figura 8. Fotografías de las semillas de maíz germinadas con diferente tratamiento:

a) T1, b) T2, c) T3, d) T4, y e) T5.

7.5 Evaluación del efecto de los hidrogeles de poli (MD-co-CS) sobre el porcentaje de germinación y crecimiento vegetal.

Semillas de maíz de la variedad ratón fueron tratadas con los hidrogeles sintetizados usando diferente concentración de agente entrecruzante. Los resultados son mostrados en la Tabla 4 y figura 9.

7.5.1 Determinación del porcentaje de germinación

De esta tabla se puede apreciar, en general, que el porcentaje de germinación disminuyó considerablemente para todas las muestras a excepción del tratamiento 13, el cual mantuvo un porcentaje de germinación similar con respecto a la muestra testigo. Este comportamiento pudiera ser debido a que los hidrogeles estén reteniendo la humedad del medio, lo cual ocasiona que el acceso a la humedad aprovechable para las semillas de maíz esta limitada y por tanto afecta su proceso de germinación.

Por otro lado, el comportamiento distinto en el tratamiento 13 pudiera ser debido a que esta muestra de hidrogel este más entrecruzada, lo cual reduciría su capacidad de absorber humedad, evitando una competencia entre el hidrogel y la semilla por el agua del medio, permitiendo que la semilla tenga más acceso a la misma y por tanto pueda tener una mejor germinación.

Además, se puede apreciar que al incrementar la concentración de los hidrogeles sintetizados con 0 y 1 % de NMBA, el porcentaje de germinación disminuyó. Así mismo, si se comparan las muestras a una misma concentración, pero con diferente

contenido de NMBA, se observa que el porcentaje de germinación disminuye al incrementar el % de agente entrecruzante. Esto pudiera sugerir que la presencia de NMBA tuvo un efecto fitotóxico sobre la plántula [REF 40].

7.5.2 Efecto sobre la longitud de radícula

En general, se observó que la longitud de raíz disminuyó en las muestras tratadas con los hidrogeles con respecto al testigo, excepto para aquellas semillas tratadas con el hidrogel sintetizado con 2.5% de NMBA. Incluso, la muestra tratada con este hidrogel a una concentración de 300 ppm (T13) mostró una mayor longitud de raíz (26.1 cm) con respecto a la del testigo (25.84 cm).

Este comportamiento puede deberse a que existe una competencia por la disponibilidad de agua en las muestras tratadas con los hidrogeles al 0 y 1 % de NMBA, ya que durante la experimentación se observó que estos hidrogeles retenían una mayor cantidad de agua.

En cambio, se observó que hubo una menor competencia por el agua entre la semilla y el hidrogel al 2.5% de NMBA sugiriendo que estos hidrogeles liberaron una mayor cantidad de agua lo cual permitió un crecimiento mayor de la raíz, debido a que estas muestras en particular si requirieron de un regado con agua durante la experimentación.

7.5.3 Efecto sobre el crecimiento de altura de plúmula

Con respecto a la longitud de plúmula, no se observó una disminución drástica en los valores de este parámetro de casi todas las muestras tratadas con los hidrogeles con respecto a aquella observada para el testigo. Incluso, la mayoría de aquellas muestras tratadas con el hidrogel sintetizado con 2.5 % de agente entrecruzante mostraron un mayor crecimiento (aproximadamente 2 cm más) con respecto al testigo.

Esto pudiera deberse a que como se mencionó anteriormente, los hidrogeles con esta cantidad de NMBA pudieron aportar una mayor cantidad de humedad a la semilla permitiendo así el aprovechamiento por parte de la misma, dando como resultado un mayor desarrollo de la plántula.

<i>Tratamiento</i>		<i>Germinación (%)</i>	<i>Raíz (cm)</i>	<i>Plúmula (cm)</i>	<i>Peso Fresco (g)</i>	<i>Peso Seco(g)</i>	<i>Agua (%)</i>
T1	Agua	97	25.84 (±4.27)	9.95 (±1.77)	25.96 (±1.78)	7.52 (±0.5)	70
T2	NMBA 0% 50PPM	38	9.47 (±2.27)	7.53 (±6.12)	18.71 (±2.33)	7.57 (± 0.15)	60
T3	NMBA 0% 100PPM	79	11.2 (±1.44)	7.23 (±1.09)	20.55 (±0.42)	7.3 (±0.21)	64
T4	NMBA 0% 200PPM	52	18.05 (±1.81)	9.95 (±1.91)	22.88 (±2.0)	7.63 (± 0.22)	66
T5	NMBA 0% 300PPM	47	7.9 (±0.78)	7.12 (±6.89)	15.4 (±0.36)	3.98 (± 0.09)	74
T6	NMBA 1% 50PPM	58	26.83 (±1.98)	11.64 (±0.98)	24 (±1.63)	6.52 (± 0.26)	72
T7	NMBA 1% 100PPM	50	13.27 (±2.34)	8.51 (±1.39)	19.61 (±2.46)	5.03 (± 0.56)	74

T8	NMBA 1% 200PPM	48	13.69 (±1.49)	7.92 (±1.36)	19 (±0.69)	5.38 (± 0.2)	71
T9	NMBA 1% 300PPM	28	3.93 (±0.51)	3.6 (±0.52)	15.28 (±2.09)	3.27 (± 0.35)	78
T10	NMBA 2.5% 50PPM	62	20.6 (±1.91)	11.55 (±1.15)	22.8 (±1.81)	5.79 (± 0.04)	74
T11	NMBA 2.5% 100PPM	36	8.68 (±1.01)	7.29 (±0.98)	17.7 (±0.83)	3.76 (± 0.37)	78
T12	NMBA 2.5% 200PPM	41	24.27 (±1.42)	11.77 (±1.09)	18.19 (±0.77)	4.54 (± 0.18)	75
T13	NMBA 2.5% 300PPM	91	26.1 (±1.21)	12.41 (±1.26)	29.37 (±2.36)	7.33 (± 0.2)	75

Tabla 4. Resultados obtenidos de la medición de germinación, crecimiento vegetal y contenido de agua de las semillas de maíz tratadas con hidrogeles de poli (MD-co-CS) a diferente concentración.

7.5.4 Determinación de porcentaje de agua

Los resultados mostraron que, de manera general, al aumentar el contenido de NMBA en los hidrogeles, las muestras tratadas aumentaban su porcentaje de agua con respecto al testigo.

Incluso las muestras tratadas con los hidrogeles sintetizados con 1 y 2.5% de NMBA mostraron mayor porcentaje de agua con respecto a aquellos valores observados para las muestras tratadas con la mezcla física de los polisacáridos, corroborando que las

muestras de maíz tratadas con la mezcla física no retienen lo suficientemente la humedad.

Finalmente, es importante mencionar que las muestras tratadas con los hidrogeles de poli(MD-co-CS) no requirieron el regado continuo con agua durante todo el experimento en comparación con las muestras tratadas con la mezcla física de estos polisacáridos. Estos resultados sugieren que los hidrogeles actuaron como reservorios de agua lo cual sería benéfico en cultivos que se encuentren en regiones con estrés hídrico, demostrando la ventaja de usar estos hidrogeles para este propósito.

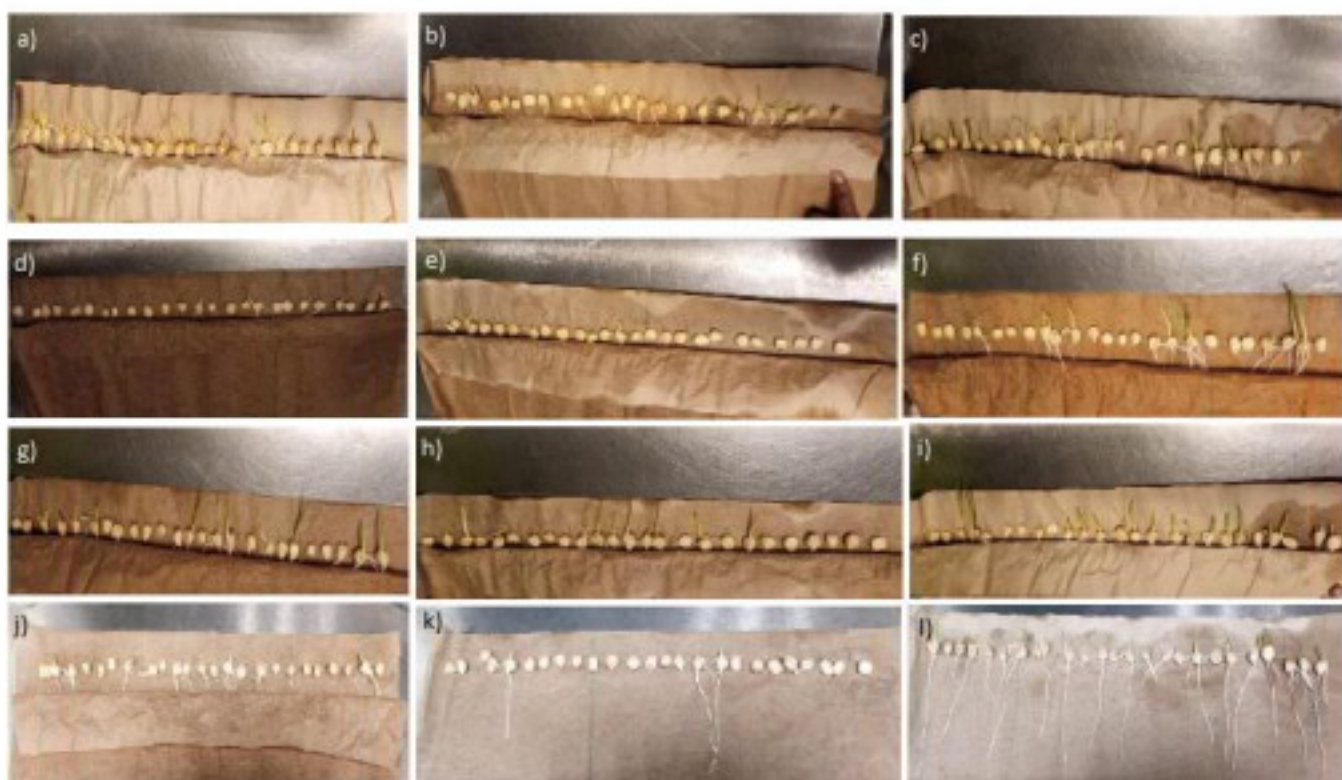


Figura 9. Imágenes de las semillas de maíz germinadas con diferentes concentraciones de Hidrogel de poli(MD-co-CS) sintetizado con diferente cantidad de NMBA: a) T1, b) T2, c) T3, d) T4, e) T5, f) T6, g) T7, h) T8, i) T9, j) T10, k) T11, l)

T12

VIII. CONCLUSIONES

- 1) Se sintetizaron exitosamente los hidrogeles de poli (MD-co-CS) mediante la polimerización por radicales libres empleando diferente concentración de NMBA. Su síntesis fue corroborada mediante FT-IR y TGA.
- 2) El porcentaje de hinchamiento de los hidrogeles sintetizados se vio afectado por la cantidad de NMBA empleada durante su síntesis, observándose una menor retención de agua para aquellos hidrogeles sintetizados con 2.5%.
- 3) El porcentaje de germinación fue mayor para aquellas semillas de maíz tratadas con los hidrogeles preparados con una mayor contenido de agente entrecruzante.
- 4) Las muestras tratadas con los hidrogeles requirieron menos riego durante la experimentación en comparación con las muestras tratadas con la mezcla física de los polisacáridos.
- 5) Las muestras tratadas con los hidrogeles sintetizados con 2.5 % de NMBA mostraron un mayor contenido de agua lo que sugiere que no hubo una competencia por la misma con la semilla de maíz, permitiendo un desarrollo adecuado de la plántula.
- 6) Los hidrogeles sintetizados con una concentración de NMBA de 2.5 % fueron los que presentaron mejores resultados en el crecimiento vegetal de plántulas de maíz.
- 7) Estos hidrogeles mostraron ser reservorios de humedad evitando el riego constante sobre la plántula siendo más efectivos en el manejo de agua.

8) Los hidrogeles de poli(MD-co-CS) pudieran ser útiles en cultivos de maíz u otros cultivos localizados en regiones que presentan estrés hídrico.

IX. REFERENCIAS

- [1] Chirani, N., Yahia, L. H., Gritsch, L., Motta, F. L., Chirani, S., & Farè, S. (2015). History and applications of hydrogels. *Journal of biomedical sciences*, 4(02), 1-23.
- [2] Soto, D., & Oliva, H. (2012). Métodos para preparar hidrogeles químicos y físicos basados en almidón: Una revisión. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 32(2), 154-175.
- [3] Wang, H., Qu, G., Liu, X., He, M., Yin, C., & Xu, R. (2025). Hydrogel materials in agriculture: a review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 116385.
- [4] Rumon, M. M. H., Akib, A. A., Sarkar, S. D., Khan, M. A. R., Uddin, M. M., Nasrin, D., & Roy, C. K. (2024). Polysaccharide-based hydrogels for advanced biomedical engineering applications. *ACS Polymers Au*, 4(6), 463-486.
- [5] Antunes, D. R., Forini, M. M., Biscalchim, É. R., Lima, P. H., Cavalcante, L. A., Teixeira Filho, M. C., ... & Grillo, R. (2024). Polysaccharide-based sustainable hydrogel spheres for controlled release of agricultural inputs. *International Journal of Biological Macromolecules*, 279, 135202.
- [6] Elangwe, C. N., Samuilova, E. O., Uspenskaya, M. V., & Olekhnovich, R. O. (2025). Review of self-healing polysaccharide-based hydrogels in tissue regeneration: Characterization methods and applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 144149.
- [7] Shakeri, F., Ariaeenejad, S., Ghollasi, M., & Motamedi, E. (2022). Synthesis of two novel bio-based hydrogels using sodium alginate and chitosan and their proficiency in physical immobilization of enzymes. *Scientific Reports*, 12(1), 2072.
- [8] Pooresmaeil, M., & Namazi, H. (2020). Application of polysaccharide-based

hydrogels for water treatments. In *Hydrogels based on natural polymers* (pp. 411-455). Elsevier.

[9] Guilherme, M. R., Aouada, F. A., Fajardo, A. R., Martins, A. F., Paulino, A. T., Davi, M. F., ... & Muniz, E. C. (2015). Superabsorbent hydrogels based on polysaccharides for application in agriculture as soil conditioner and nutrient carrier: A review. *European Polymer Journal*, 72, 365-385.

[10] Prisa, D., & Guerrini, G. (2022). Hydrogel application in the germination and growth of *Zea mays* and *Solanum lycopersicum* seedlings. *GSC Advanced Research and Reviews*, 12(3), 26-32.

[11] Lestari, R. S., Barleany, D. R., Pitaloka, A. B., Yulvianti, M., Lumbantobing, P. I., & Prasetyo, Z. E. (2024). Synthesis of polyvinyl alcohol-based polymer hydrogel as water holding in sandy soil using gamma radiation technique and its application for urea loading. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9, 100634.

[12] Sultan, M., & Taha, G. (2024). Sustained-release nitrogen fertilizer delivery systems based on carboxymethyl cellulose-grafted polyacrylamide: Swelling and release kinetics. *International Journal of Biological Macromolecules*, 266, 131184.

[13] Khan, M., Qadri, W. A., & Rk, G. (2020). Polysaccharide based superabsorbent polymer: a review. *Compliance Engineering Journal*, 11(9), 261-272.

[14] Parikh, A., Agarwal, S., & Raut, K. (2014). A review on applications of maltodextrin in pharmaceutical industry. *system*, 4(6), 67-74.

[15] Nurhadi, B., Roos, Y. H., & Maidannyk, V. (2016). Physical properties of maltodextrin DE 10: Water sorption, water plasticization and enthalpy relaxation. *Journal of Food Engineering*, 174, 68-74.

- [16] Aranaz, I., Alcántara, A. R., Civera, M. C., Arias, C., Elorza, B., Heras Caballero, A., & Acosta, N. (2021). Chitosan: An overview of its properties and applications. *Polymers*, 13(19), 3256.
- [17] Nandiyanto, A. B. D., Oktiani, R., & Ragadhita, R. (2019). How to read and interpret FTIR spectroscopy of organic material. *Indonesian Journal of Science and Technology*, 4(1), 97-118.
- [18] Coats, A. W., & Redfern, J. P. (1963). Thermogravimetric analysis. A review. *Analyst*, 88(1053), 906-924.
- [19] Ibrahim, M. M., Abd - Eladl, M., & Abou - Baker, N. H. (2015). Lignocellulosic biomass for the preparation of cellulose - based hydrogel and its use for optimizing water resources in agriculture. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(42).
- [20] Chen, X., Mao, X., Lu, Q., Liao, Z., & He, Z. (2016). Characteristics and mechanisms of acrylate polymer damage to maize seedlings. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 129, 228-234.
- [21] Elbarbary, A. M., & Ghobashy, M. M. (2017). Controlled release fertilizers using superabsorbent hydrogel prepared by gamma radiation. *Radiochimica Acta*, 105(10), 865-876.
- [22] Xian, C. H. E. N., Huang, L., Xiaoyun, M. A. O., Zongwen, L. I. A. O., & Zhenli, H. E. (2017). A comparative study of the cellular microscopic characteristics and mechanisms of maize seedling damage from superabsorbent polymers. *Pedosphere*, 27(2), 274-282.
- [23] Mazloom, N., Khorassani, R., Zohury, G. H., Emami, H., & Whalen, J. (2020). Lignin-based hydrogel alleviates drought stress in maize. *Environmental and Experimental Botany*, 175, 104055.

- [24] Yang, L., Song, Z., Li, C., Huang, S., Cheng, D., & Zhang, Z. (2021). Fabricated chlorantraniliprole loaded chitosan/alginate hydrogel rings effectively control *Spodoptera frugiperda* in maize ears. *Crop Protection*, 143, 105539.
- [25] Yang, W., Qu, Z., Feng, G., Yang, Y., & Song, R. (2023). Response of root growth and distribution of maize plants to foliar-sprayed antitranspirant and soil-amended hydrogel polymer. *Chilean journal of agricultural research*, 83(1), 94-106.
- [26] Watcharamul, S., Lerddamrongchai, S., Siripongpreda, T., Rodtassana, C., Nuisin, R., & Kiatkamjornwong, S. (2022). Effects of carboxymethyl cellulose/nano-calcium carbonate hydrogel amendment of loamy sand soil for maize growth. *ACS Agricultural Science & Technology*, 2(5), 1071-1080.
- [27] Ghobashy, M. M., Amin, M. A., Ismail, M. A., Nowwar, A. I., El-Diehy, M. A., & Gayed, H. M. (2023). Radiation cross-linked ultra-absorbent hydrogel to rationalize irrigation water and fertilizer for maize planting in drought conditions. *International Journal of Biological Macromolecules*, 252, 126467.
- [28] Moghaddam, R. H., Dadfarnia, S., Shabani, A. M. H., & Shirmardi, S. P. (2024). Design and manufacture of new hybrid hydrogel and superabsorbent polymer for controlled release of fulvic acid based on grafted xanthan gum/gelatin using electron irradiation and its use in fodder corn cultivation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 266, 131360.
- [29] Lv, Q., Xiao, T., Dong, G., Tan, X., Zhang, Z., Zhao, M., ... & Zhang, W. (2024). Preparation and characterization of starch carbamate modified natural sodium alginate composite hydrogel blend formulation and its application for slow-release fertilizer. *International Journal of Biological Macromolecules*, 278, 134713.
- [30] Lima-Tenório, M. K., Karas, L. P., Furmam-Cherobim, F., Guerlinguer, E., Rubira, A. F., Steffens, M. B. R., ... & Etto, R. M. (2024). Encapsulation of Plant Growth-

Promoting Bacteria with Gum Arabic Hydrogels: A Potential System for Sustainable Agriculture. *Journal of Polymers and the Environment*, 32(11), 5702-5712.

[31] Channab, B. E., Tayi, F., Aqlil, M., Akil, A., Essamlali, Y., Chakir, A., & Zahouily, M. (2024). Graphene oxide, starch, and kraft lignin bio-nanocomposite controlled-release phosphorus fertilizer: Effect on P management and maize growth. *International Journal of Biological Macromolecules*, 282, 137190.

[32] Zhang, Y. H., Wei, L. Q., Liu, C. S., Jiang, X. Q., Wu, W. S., Wei, S. P., ... & Zhong, Z. (2025). Facile Construction of Eco-friendly Chitosan-Based Supramolecular Hydrogels as Pesticide Delivery Systems for Plant Growth Regulation and Antifungal Applications. *ACS omega*, 10(34), 39162-39173.

[33] El Idrissi, A., Tayi, F., Dardari, O., Akil, A., Amadine, O., Lu, L., ... & Essamlali, Y. (2025). Development of Multifunctional Carboxymethyl Starch-Based Semi-IPN Hydrogels for Water and Fertilizer Management in Maize Cultivation under Different Water Deficit Conditions. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 13(19), 7286-7298.

[34] Paulino, A. T., Pereira, A. G., Fajardo, A. R., Erickson, K., Kipper, M. J., Muniz, E. C., ... & Tambourgi, E. B. (2012). Natural polymer-based magnetic hydrogels: Potential vectors for remote-controlled drug release. *Carbohydrate polymers*, 90(3), 1216-1225.

[35] El-Dib, F. I., Eshaq, G., ElMetwally, A. E., & Hefni, H. H. (2021). Enhancing the porous structure of swellable poly (acrylic acid-co-acrylamide) crosslinked by N-Maleyl chitosan via introducing foaming agents and non-ionic surfactant. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 4(1), 9-18.

[36] Meléndez-Ortiz, H. I., Betancourt-Galindo, R., Puente-Urbina, B., Sánchez-Orozco, J. L., & Ledezma, A. (2022). Antimicrobial cotton gauzes modified with poly

(acrylic acid-co-maltodextrin) hydrogel using chitosan as crosslinker. *International Journal of Biological Macromolecules*, 198, 119-127.

[37] Meléndez-Ortiz, H. I., Betancourt-Galindo, R., Puente-Urbina, B., Ledezma, A., & Rodríguez-Fernández, O. (2022). Synthesis and characterization of hydrogels based on maltodextrins with antimicrobial properties. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, 71(13), 959-968.

[38] Sousa, J. M., Vieira, A. C., Costa, M. P., Rizzo, M. S., Chaves, L. L., Braz, E. M., ... & Silva-Filho, E. C. (2022). Chitosan grafted with maleic anhydride and ethylenediamine: preparation, characterization, computational study, antibacterial and cytotoxic properties. *Materials Chemistry and Physics*, 287, 126301.

[39] Septiawan, M. R., Permana, D., Sabarwati, S. H., Ahmad, L. O., & Ramadhan, L. O. A. N. (2018). Functionalization of chitosan with maleic anhydride for proton exchange membrane. *Indonesian Journal of Chemistry*, 18(2), 313-320.

[40] Rašovský, M., Pačuta, V., Gažo, J., Nika, B., Lenická, D., Michalska-Klimczak, B., & Wszyński, Z. (2023). Impact of seed coating with superabsorbent polymers on morphological, physiological and production traits of maize (*Zea mays* L.). *Plant, Soil & Environment*, 69(12).