

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERIA



SÍNTESIS, CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE HIDROGELES A
BASE DE MALTODEXTRINA, QUITOSANO Y ALGINATO EN EL
CRECIMIENTO VEGETAL DE SEMILLAS DE MAÍZ (*Zea mays L.*)

POR

ALONDRA QUETZALLI SOTO FUENTES

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO

DE:

INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA

SALTILLO, COAHUILA

JUNIO 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERIA

SÍNTESIS, CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE HIDROGELES A
BASE DE MALTODEXTRINA, QUITOSANO Y ALGINATO EN EL
CRECIMIENTO VEGETAL DE SEMILLAS DE MAÍZ (*Zea mays L.*)

TESIS

PRESENTADA POR

ALONDRA QUETZALLI SOTO FUENTES

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

INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA

APROBADA



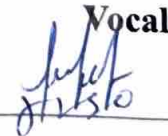
Dra. Sonia Noemí Ramírez Barrón
Presidente



Dr. Héctor Iván Meléndez Ortiz
Vocal



Dra. Rebeca Betancourt Galindo
Vocal



Dr. Jorge Luis Sánchez Orozco
Vocal



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

Buenvista, Saltillo, Coahuila, México

Junio de 2026

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRIARIA ANTONIO NARRO

UNIDAD SALTILLO

SÍNTESIS, CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE HIDROGELES A
BASE DE MALTODEXTRINA, QUITOSANO Y ALGINATO EN EL
CRECIMIENTO VEGETAL DE SEMILLAS DE MAÍZ (*Zea mays L.*)

TESIS

ELABORADA POR:

ALONDRA QUETZALLI SOTO FUENTES

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



Dr. Héctor Iván Meléndez Ortíz

Asesor externo



Dra. Rebeca Betancourt Galindo

Co-asesor



Q.F.B Bertha Alicia Puente Urbina

Co-asesor

SALTILLO, COAHUILA

JUNIO 2026

DERECHO DE AUTOR Y DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

Todo material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor de los Estados Unidos Mexicanos, y pertenece al autor principal quien es el responsable directo y jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, gráficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente. Así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Por lo anterior nos responsabilizamos de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaramos que este trabajo no ha sido previamente presentado en ninguna otra institución educativa, organización, medio público o privado.

Atentamente.

Alma Terra Mater



Alondra Quetzalli Soto Fuentes

Autor Principal



Dra. Sonia Noemí Ramírez Barrón

Asesor Principal

DEDICATORIA

A Dios, por darme la sabiduría, la fortaleza y la oportunidad de culminar esta etapa tan importante de mi vida, por bendecirme constantemente y guiar cada uno de mis pasos a lo largo de este camino.

A mis padres, Ana Fuentes y Javier Soto, por ser mi base, mi ejemplo y mi motor. Gracias por ser el pilar fundamental en mi formación, por su amor incondicional, su apoyo constante y por enseñarme a nunca rendirme. Este logro también es de ustedes.

A mis hermanos, Anayancy y Ramsés, por acompañarme en este proceso y ser parte importante de mi vida.

A mis padrinos, Rosario Gaona y José de León, por ser un soporte vital en mi crecimiento personal y profesional, por su guía y apoyo en momentos clave.

A mis mascotas, en especial a Frijolito y Chenchá, quienes, aunque ya no están, me acompañaron desde el inicio de mi carrera. Es imposible no recordarlos en esos desvelos, haciéndome compañía mientras avanzaba en mis tareas.

A mis mejores amigos, Pablo, Nalle, Lis y David, por estar siempre presentes, por su apoyo ilimitado, por sus palabras de aliento y por creer en mí incluso cuando yo dudaba.

A mis chulis, Dany y Grecia, por su enorme apoyo durante mi intercambio en Irlanda y por ayudarme a tomar decisiones que hoy me permiten estar cerrando este ciclo.

Al rejejo, mi carro, por ser mi compañero fiel, llevándome todos los días a la escuela y siendo testigo de este proceso.

Y, por último, a mí misma, por no rendirme, por seguir adelante incluso cuando todo se sentía pesado, por aguantar, por insistir y por demostrarme que sí puedo.

AGRADECIMIENTOS

A mi asesor de tesis, el Dr. Héctor Iván Meléndez Ortiz, por su guía, paciencia y conocimientos brindados a lo largo de este proyecto, los cuales fueron fundamentales para la culminación de este.

A mi co-asesora, la Dra. Rebeca Betancourt Galindo, por su disposición y acompañamiento durante el desarrollo de esta investigación.

A la Q.F.B. Bertha Puente Urbina, por su invaluable ayuda en el laboratorio, por su tiempo y por compartir sus conocimientos conmigo, así como al Ing. Jesús Alfonso Mercado Silva por su apoyo en los estudios de caracterización de los hidrogeles.

A la Dra. Yolanda Ortega, por su apoyo y orientación en momentos clave de este proceso.

Al Centro de Investigación en Química Aplicada, por abrirme sus puertas y brindarme el espacio y las herramientas necesarias para el desarrollo de esta investigación.

A la Dra. Ileana Vera, por facilitarme el uso de los laboratorios, lo cual fue esencial para llevar a cabo este trabajo.

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, mi alma mater, por mi formación académica y por darme las bases para llegar hasta este momento.

A la Dra. Sonia Ramírez Barrón, jefa de carrera, por su apoyo y acompañamiento durante mi trayectoria académica.

Al M.C. Carlos García Agustince, por su apoyo incondicional, motivación y por impulsarme a seguir adelante.

A la Dra. Martha Gómez (Q.E.P.D.), quien dejó una huella muy importante en mi formación, ya que gracias a ella encontré el sentido y la pasión por la genética y por mi carrera.

A la Miss Luz María López, por su apoyo constante y por ser testigo de mi crecimiento académico y personal.

A Rafael Cervantes y Jorge Vasquez, por su apoyo y por estar presentes a lo largo de este camino.

A Juanita Sifuentes, mi controlista, por su orientación y ayuda en cada paso administrativo.

A la Dra. Xóchitl Ruelas, por su apoyo como maestra y como subdirectora de licenciatura.

A la Dra. Erika Carrizales, por su apoyo durante este proceso.

Al Departamento de Idiomas, por abrirme sus puertas, por su apoyo constante y por brindarme un espacio donde pude avanzar en mis tareas, descansar cuando lo necesitaba y seguir adelante en este proceso.

A mis amigos de carrera, por compartir conmigo este camino lleno de aprendizajes, estrés, retos y momentos inolvidables que se quedaron en mi corazón para siempre.

A mis compañeras de laboratorio, Luz y Dany, por su apoyo diario, por su paciencia al explicarme y por motivarme a seguir adelante.

A Cinépolis Paseo Villalta, por brindarme la oportunidad de trabajar mientras estudiaba y permitirme crecer en distintos aspectos de mi vida.

A mis amigos del cine, Andrea, Doña Geno, Doña Claudia, Don Armando, Don Daniel, Doña Nubia, Fermin, Luis, Angie, por todo su apoyo y motivación.

A Quetzalli, por ser una gran amiga durante este proceso y por acompañarme en este camino.

A mis amigos del “grupo buitres”, por las risas, los ánimos y por hacer de este camino algo más llevadero, incluso en los momentos más pesados.

RESUMEN

El desarrollo de materiales poliméricos con aplicaciones agrícolas ha cobrado relevancia debido a la necesidad de optimizar el uso del agua en sistemas productivos. En el presente trabajo se desarrollaron y caracterizaron dos hidrogeles basados en polisacáridos, específicamente uno conteniendo quitosano-alginato oxidado (CS/AlgOx) y un sistema ternario incorporando alginato con un copolímero de maltodextrina/quitosano ((MD-CS) /Alg) con el objetivo de evaluar su efecto sobre la germinación y el crecimiento inicial de plántulas de maíz.

El AlgOx fue obtenido mediante oxidación con peryodato de sodio, generando grupos funcionales tipo aldehído que permitieron la formación de redes poliméricas a través de enlaces tipo base de Schiff con el CS.

Los hidrogeles fueron caracterizados a través de espectroscopía FTIR, donde se confirmó la formación de enlaces C=N particularmente en el hidrogel CS/AlgOx, y con análisis termogravimétrico (TGA), evidenciando cambios en las bandas de absorción y en la estabilidad térmica en ambos hidrogeles respecto a los componentes individuales. Asimismo, se evaluó la capacidad de retención de agua de los sistemas.

Posteriormente, se analizó el efecto de la concentración de estos hidrogeles (50, 100, 150, 200 y 300 ppm) sobre semillas de maíz de la variedad ratón, evaluando porcentaje de germinación, longitud de raíz y plúmula, peso fresco, peso seco y contenido de agua. Los resultados indicaron que ambos sistemas no presentan efectos fitotóxicos y que su desempeño depende de su composición y concentración, destacando el hidrogel ternario (MD-CS) /Alg por su mayor capacidad de retención hídrica, lo cual influye en el desarrollo inicial de las plántulas.

ABSTRACT

The development of polymeric materials with agricultural applications has gained relevance due to the need to optimize water use in productive systems. In the present study, two polysaccharide-based hydrogels were developed and characterized, specifically one containing chitosan-oxidized alginate (CS/AlgOx) and a ternary system incorporating alginate with a maltodextrin/chitosan copolymer ((MD-CS)/Alg), with the aim of evaluating their effect on the germination and initial growth of maize seedlings.

AlgOx was obtained through oxidation with sodium periodate, generating aldehyde functional groups that enabled the formation of polymeric networks through Schiff base linkages with CS.

The hydrogels were characterized by FTIR spectroscopy, which confirmed the formation of C=N bonds, particularly in the CS/AlgOx hydrogel, and by thermogravimetric analysis (TGA), showing changes in the absorption bands and thermal stability of both hydrogels compared to the individual components. In addition, the water retention capacity of the systems was evaluated.

Subsequently, the effect of different hydrogel concentrations (50, 100, 150, 200, and 300 ppm) on maize seeds of the “ratón” variety was analyzed by evaluating germination percentage, root and plumule length, fresh weight, dry weight, and water content. The results indicated that both systems did not show phytotoxic effects and that their performance depends on their composition and concentration, with the ternary hydrogel (MD-CS)/Alg standing out due to its greater water retention capacity, which influences the first development of the seedlings.

ÍNDICE

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Planteamiento del problema	2
II. MARCO TEÓRICO	4
2.1. Hidrogeles.....	4
2.2. Hidrogeles a base de polisacáridos.....	5
2.3. Hidrogeles a base de polisacáridos empleados en agricultura.....	5
2.3.1. Maltodextrina (MD)	6
2.3.2. Quitosano (CS).....	6
2.3.3. Alginato (Alg) y alginato oxidado (AlgOx)	7
2.4. Técnicas de caracterización de hidrogeles.....	8
2.4.1. Espectroscopia de Infrarrojo (FT-IR)	8
2.4.2. Análisis Termogravimétrico (TGA)	9
2.5. Pruebas de hinchamiento en hidrogeles.....	9
2.6. Germinación de semillas	10
2.7. Antecedentes.....	10
III. JUSTIFICACIÓN.....	15
IV. HIPÓTESIS	15
V. OBJETIVOS.....	16
5.1. Objetivo general	16
5.2. Objetivos específicos.....	16

VI.	METODOLOGÍA.....	17
6.1.	Síntesis del hidrogel de CS/AlgOx.....	17
6.1.1.	Preparación de AlgOx.....	17
6.1.2.	Reacción de polimerización para obtener de CS/AlgOx.....	18
6.2.	Síntesis de hidrogel ternario (MD-CS) /Alg.....	18
6.3.	Caracterización del hidrogel CS/AlgOx y (MD/CS) /Alg.....	19
6.3.1.	Espectroscopia FTIR	19
6.3.2.	Análisis TGA.....	20
6.4.	Pruebas de hinchamiento.....	21
6.5.	Evaluación del efecto del hidrogel sobre el crecimiento y desarrollo de plántulas de maíz	22
6.5.1.	Preparación de las dispersiones de hidrogeles de CS/AlgOx y (MD-CS) /Alg.....	22
6.5.2.	Preparación y desinfección de semillas.....	24
6.5.3.	Preparación del sistema de germinación	24
6.5.4.	Siembra y establecimiento del experimento.....	24
6.5.5.	Formación de unidades experimentales (“tacos”).....	24
6.5.6.	Condiciones de incubación.....	25
6.5.7.	Evaluación del crecimiento y determinación de contenido de agua.....	25
VII.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	26
7.1.	Síntesis y caracterización del hidrogel de CS/AlgOx.....	26
7.1.1.	Espectroscopia de FTIR del AlgOx.....	26
7.1.2.	Análisis de TGA del AlgOx.....	27
7.1.3.	Espectroscopia de FTIR del hidrogel CS/AlgOx	29
7.1.4.	Análisis de TGA del hidrogel CS/AlgOx	31
7.1.5.	Pruebas de hinchamiento del hidrogel CS/AlgOx.....	32

7.2.	Síntesis y caracterización del hidrogel (MD-CS) /Alg.....	34
7.2.1.	Espectroscopia de FTIR del hidrogel (MD-CS) /Alg.....	34
7.2.2.	Análisis de TGA del hidrogel (MD-CS) /Alg.....	36
7.2.3.	Pruebas de hinchamiento del hidrogel CS/AlgOx.....	38
7.3.	Evaluación del efecto de los hidrogeles sobre el porcentaje de germinación y crecimiento vegetal.....	39
7.3.1.	Evaluación del hidrogel de CS/AlgOx	39
7.3.2.	Evaluación del hidrogel de (MD-CS) /Alg.....	42
VIII.	CONCLUSIONES.....	45
IX.	REFERENCIAS	47
X.	ANEXOS.....	52

I. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso fundamental para el desarrollo de los sistemas agrícolas, ya que participa directamente en procesos fisiológicos esenciales como la imbibición, la germinación y el crecimiento inicial de las plantas [1-2]. Durante la fase de germinación, la disponibilidad hídrica determina la activación metabólica de la semilla, influyendo en la emergencia y establecimiento de la plántula [3]. Sin embargo, en muchas regiones, especialmente en zonas áridas y semiáridas, la disponibilidad de agua es limitada y su distribución en el suelo es heterogénea, lo que afecta negativamente el rendimiento de los cultivos.

Ante este escenario, se ha incrementado el interés en el desarrollo de materiales que permitan mejorar la eficiencia en el uso del agua. Entre estos, los hidrogeles han destacado por su capacidad de absorber grandes cantidades de agua y liberarla de manera gradual, actuando como reservorios que mantienen condiciones de humedad más estables en el entorno radicular [4-5]. Esta propiedad resulta particularmente relevante en etapas tempranas del desarrollo vegetal, donde pequeñas variaciones en la disponibilidad de agua pueden generar cambios significativos en el crecimiento.

Los hidrogeles pueden ser sintetizados a partir de polímeros sintéticos o naturales; sin embargo, los materiales de origen natural han cobrado mayor relevancia debido a su biodegradabilidad, biocompatibilidad y menor impacto ambiental [6-7]. En este contexto, el quitosano (CS) y alginato (Alg) representan algunos de los polisacáridos más estudiados para la formación de hidrogeles [8,13].

El CS, derivado de la quitina, presenta grupos amino que le confieren reactividad química, permitiendo su participación en la formación de enlaces covalentes [8,10]. Por su parte, el Alg, un polisacárido extraído de algas puede ser modificado químicamente para aumentar su funcionalidad [13]. Una de las modificaciones más relevantes de este polisacárido es la oxidación mediante peryodato, la cual introduce grupos aldehído en la estructura del polímero. Estos grupos pueden reaccionar con los grupos amino del CS mediante enlaces tipo base de Schiff, dando lugar a redes tridimensionales con mayor estabilidad estructural [21,22].

Adicionalmente, la incorporación de otros polisacáridos, como la maltodextrina (MD), que es obtenida a partir de la hidrólisis parcial del almidón, generalmente proveniente de fuentes como maíz, papa o arroz puede modificar la organización interna del hidrogel, afectando propiedades como la capacidad de retención de agua, la porosidad y la flexibilidad de la red [14-15]. Estas modificaciones estructurales pueden influir directamente en la interacción del material con sistemas biológicos, como las semillas durante el proceso de germinación.

A pesar de los avances en el desarrollo de hidrogeles, su comportamiento en aplicaciones agrícolas no es completamente predecible, ya que depende de múltiples factores, incluyendo la composición del material, su grado de reticulación y la concentración aplicada [19,20]. En algunos casos, se ha reportado que los hidrogeles favorecen la germinación y el crecimiento vegetal al mejorar la disponibilidad de agua; sin embargo, en otros, pueden generar efectos negativos cuando se presentan condiciones de saturación hídrica o limitación de oxígeno en la zona radicular [18].

Con base en lo anterior, el presente trabajo de tesis se enfocó en la síntesis y caracterización de hidrogeles binarios y ternarios basados en CS, Alg y MD, así como en la evaluación de su efecto sobre la germinación y crecimiento inicial de plántulas de maíz, con el fin de analizar cómo la composición y concentración de estos polisacáridos influye en el desarrollo vegetal.

1.1. Planteamiento del problema

Los hidrogeles basados en polímeros naturales presentan comportamientos variables dependiendo de su composición y estructura. En particular, la combinación de CS con AlgOx y la incorporación de MD generan modificaciones en la red polimérica que pueden influir en la forma en que el agua es retenida y liberada, afectando así el proceso de germinación.

Asimismo, la concentración del hidrogel representa un factor determinante, ya que niveles adecuados pueden favorecer la hidratación de la semilla, mientras que concentraciones elevadas pueden generar condiciones de exceso de humedad que limiten la disponibilidad de oxígeno, afectando principalmente el crecimiento radicular [19,20].

En el caso del maíz, existe información limitada sobre cómo estos sistemas específicos de hidrogeles (CS/AlgOx y (MD-CS)/Alg) influyen en el desarrollo inicial de las plántulas, lo que hace necesario evaluar su efecto bajo condiciones controladas.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Hidrogeles

Los hidrogeles son materiales poliméricos tridimensionales capaces de absorber y retener grandes cantidades de agua sin perder su integridad estructural. Esta propiedad se debe a la presencia de grupos funcionales hidrofílicos, como hidroxilos, carboxilos y amino, los cuales interactúan con las moléculas de agua mediante enlaces de hidrógeno [4,5].

La estructura de un hidrogel se encuentra formada por cadenas poliméricas unidas a través de enlaces físicos o químicos (Figura 1). Los hidrogeles físicos se forman mediante interacciones intermoleculares reversibles, como fuerzas electrostáticas o puentes de hidrógeno, mientras que los hidrogeles químicos presentan enlaces covalentes permanentes que les confieren mayor estabilidad [5,20].

Además de su capacidad de absorción, los hidrogeles pueden modificar propiedades como difusión de agua, elasticidad y estabilidad térmica dependiendo de su composición y grado de reticulación. Debido a ello, han sido empleados en áreas biomédicas, farmacéuticas, ambientales y agrícolas [4,6].

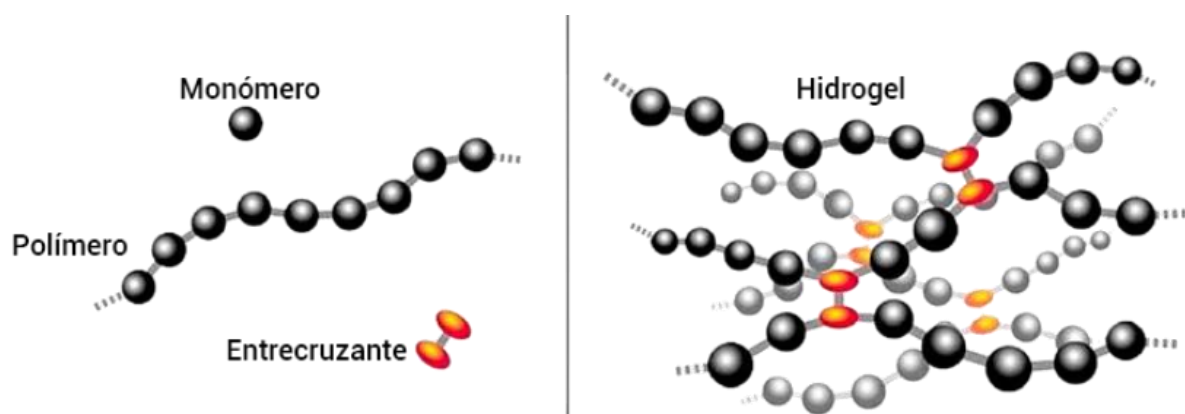


Figura 1. Estructura representativa de un hidrogel; recuperada de Eficagua [33].

2.2. Hidrogeles a base de polisacáridos

Los hidrogeles basados en polisacáridos son materiales obtenidos a partir de polímeros naturales como CS, Alg, almidón, celulosa y derivados glucosídicos. Estos materiales presentan ventajas importantes frente a polímeros sintéticos debido a su biodegradabilidad, biocompatibilidad y baja toxicidad [7].

La presencia de múltiples grupos funcionales en los polisacáridos permite modificar químicamente sus estructuras y formar redes poliméricas con propiedades específicas. Según Rinaudo (2006) [8], los polisacáridos representan una de las fuentes más importantes para el desarrollo de biomateriales debido a su capacidad de interacción química y física.

Asimismo, los hidrogeles de polisacáridos pueden presentar elevada capacidad de hinchamiento y comportamiento sensible a factores como pH, temperatura y fuerza iónica del medio [9].

2.3. Hidrogeles a base de polisacáridos empleados en agricultura.

En agricultura, los hidrogeles se han utilizado principalmente como materiales retenedores de agua, ya que pueden absorber grandes volúmenes de humedad y liberarla gradualmente al entorno. Esta propiedad permite reducir pérdidas de agua por evaporación y mantener condiciones de humedad más estables alrededor de la raíz [17].

Diversos estudios han reportado que la incorporación de hidrogeles en sistemas agrícolas puede favorecer procesos de germinación y crecimiento vegetal, particularmente en condiciones de estrés hídrico [18-20]. Sin embargo, el efecto depende de variables como composición química, capacidad de hinchamiento y concentración del material.

Además, los hidrogeles basados en polisacáridos presentan ventajas ambientales debido a su capacidad de degradación natural, reduciendo la acumulación de residuos poliméricos en el suelo [19].

2.3.1. Maltodextrina (MD)

La MD es un polisacárido obtenido mediante la hidrólisis parcial del almidón, generalmente proveniente de maíz, arroz o papa. Está compuesta principalmente por cadenas cortas de glucosa unidas mediante enlaces α -(1 \rightarrow 4) (Figura 2) [14].

Este material presenta alta solubilidad en agua y numerosos grupos hidroxilo en su estructura, lo que favorece la formación de puentes de hidrógeno y su interacción con otros polímeros [15]. Debido a estas características, la MD ha sido utilizada en la elaboración de películas, encapsulación de compuestos y síntesis de materiales hidroabsorbentes.

En sistemas de hidrogeles, la MD puede contribuir a modificar propiedades como flexibilidad, absorción de agua y estabilidad estructural [16].

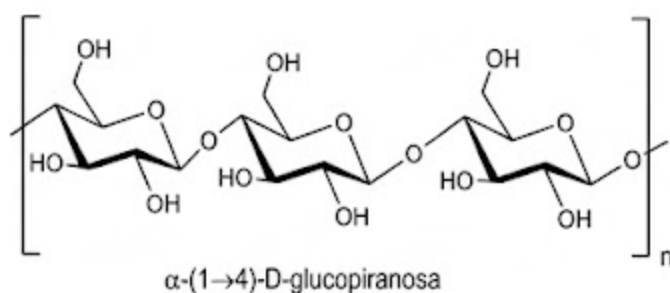


Figura 2. Estructura química de la MD.

2.3.2. Quitosano (CS)

El CS es un polisacárido derivado de la desacetilación de la quitina, compuesto principalmente por unidades de D-glucosamina y N-acetil-D-glucosamina (Figura 3) [10].

Una de sus características principales es la presencia de grupos amino libres, los cuales permiten su interacción con otros polímeros y compuestos cargados negativamente [11]. Además, presenta propiedades antimicrobianas y biocompatibles, lo que ha favorecido su uso en agricultura y aplicaciones biomédicas.

En la formación de hidrogeles, el CS puede participar tanto en enlaces físicos como químicos, formando estructuras tridimensionales estables [12].

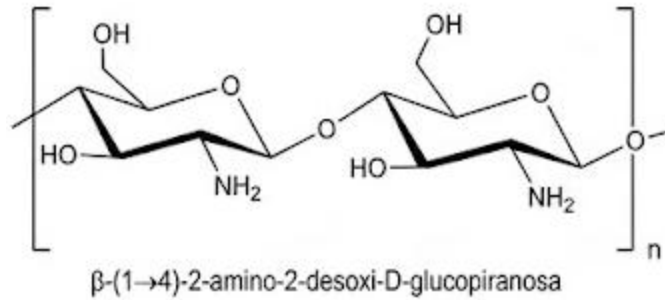


Figura 3. Estructura química del CS.

2.3.3. Alginato (Alg) y alginato oxidado (AlgOx)

El Alg es un polisacárido aniónico extraído principalmente de algas pardas. Su estructura está formada por bloques de ácido β-D-manurónico y α-L-gulurónico (Figura 4) [13].

Este polímero tiene la capacidad de formar geles en presencia de cationes divalentes, particularmente calcio, mediante un mecanismo conocido como “modelo de caja de huevo” [16]. Asimismo, la oxidación parcial del Alg mediante peryodato permite generar grupos aldehído reactivos que facilitan la formación de redes poliméricas más complejas (Figura 5) [22].

Debido a su biocompatibilidad y facilidad de gelificación, el Alg es uno de los polisacáridos más utilizados en síntesis de hidrogeles [23].

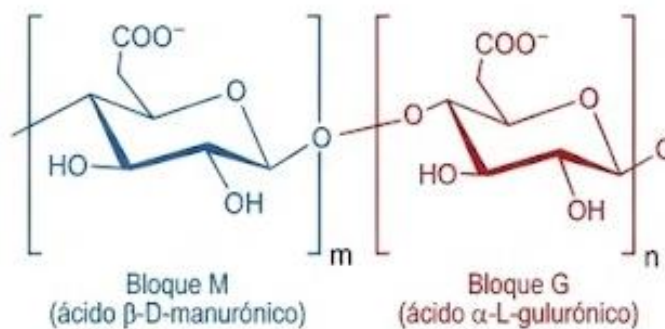


Figura 4. Estructura química del Alg.

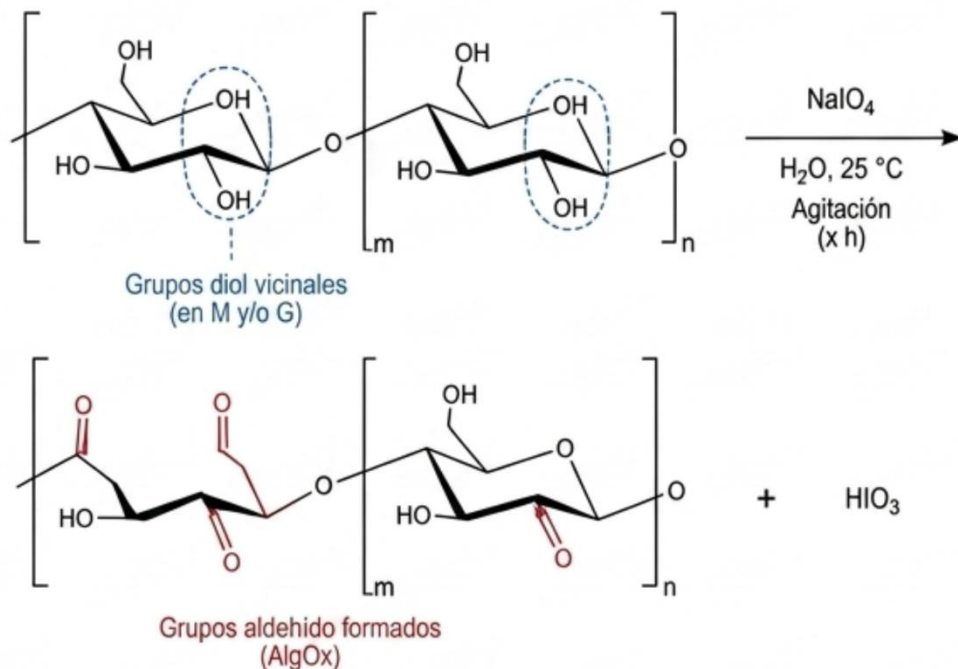


Figura 5. Representación esquemática de la oxidación del Alg mediante peryodato de sodio para obtener AlgOx.

2.4. Técnicas de caracterización de hidrogeles

La caracterización de hidrogeles es fundamental para comprender sus propiedades estructurales, térmicas y funcionales. Entre las técnicas más utilizadas destacan la espectroscopía FTIR, el análisis termogravimétrico y las pruebas de hinchamiento [28].

2.4.1. Espectroscopia de Infrarrojo (FT-IR)

La espectroscopía FTIR es una técnica utilizada para identificar los grupos funcionales presentes en un material mediante la medición de la absorción de radiación infrarroja.

En hidrogeles, esta técnica permite analizar cambios estructurales asociados a interacciones químicas o físicas entre polímeros. El desplazamiento, desaparición o aparición de bandas características puede indicar procesos de entrecruzamiento o formación de nuevos enlaces [29].

Además, FTIR es ampliamente utilizado para confirmar modificaciones químicas en polisacáridos, como oxidación o formación de enlaces tipo base de Schiff [30-31].

2.4.2. Análisis Termogravimétrico (TGA)

El análisis termogravimétrico (TGA) evalúa la estabilidad térmica de un material mediante la medición de la pérdida de peso en función de la temperatura.

Esta técnica permite identificar diferentes etapas de degradación, como la pérdida de agua y la descomposición de la estructura polimérica. Además, el análisis de la derivada de peso (DTG) facilita la identificación de los puntos donde ocurre la máxima velocidad de degradación. En sistemas poliméricos, el análisis DTG resulta útil para comparar estabilidad térmica entre componentes individuales, mezclas físicas e hidrogeles reticulados

Según diversos estudios, los cambios en los perfiles térmicos pueden indicar la formación de nuevas estructuras, diferenciando entre mezclas físicas y sistemas reticulados [30-32].

2.5. Pruebas de hinchamiento en hidrogeles

Las pruebas de hinchamiento permiten evaluar la capacidad de un hidrogel para absorber agua y aumentar su volumen. Este comportamiento depende de factores como composición química, densidad de reticulación y presencia de grupos hidrofílicos.

La capacidad de hinchamiento es una de las propiedades más importantes en aplicaciones agrícolas, ya que determina la eficiencia del hidrogel para almacenar y liberar agua [19-20].

Generalmente, el porcentaje de hinchamiento se calcula a partir de la diferencia entre el peso seco y el peso hidratado del material.

2.6. Germinación de semillas

La germinación es un proceso fisiológico mediante el cual la semilla inicia su desarrollo metabólico y da origen a una nueva plántula (Figura 6).

Durante este proceso, la absorción de agua constituye una etapa fundamental, ya que activa enzimas y mecanismos metabólicos necesarios para el crecimiento embrionario.

Factores como disponibilidad de agua, oxígeno y temperatura influyen directamente sobre la velocidad y porcentaje de germinación [1-2]. En este sentido, materiales capaces de modificar la disponibilidad hídrica, como los hidrogeles, pueden influir significativamente en el desarrollo inicial de las plántulas.

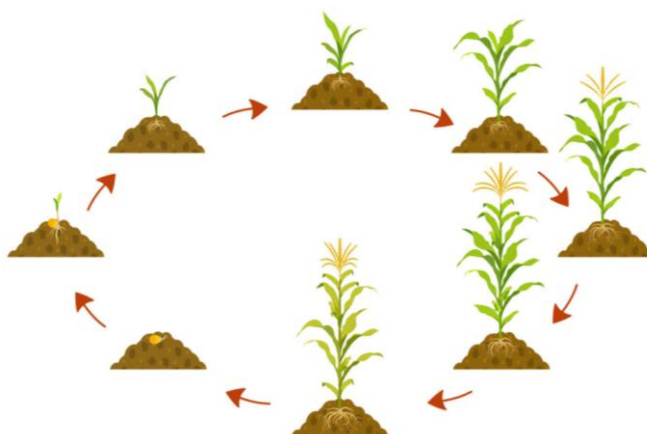


Figura 6. Ciclo de vida de las semillas de maíz; tomado de Semillas Hacienda [34].

2.7. Antecedentes

En las últimas décadas, la agricultura ha enfrentado desafíos importantes relacionados con la disponibilidad de agua, la baja eficiencia en el aprovechamiento de fertilizantes y el impacto ambiental derivado del uso excesivo de agroquímicos. Debido a ello, el desarrollo de materiales poliméricos biodegradables capaces de retener agua y liberar nutrientes o compuestos activos de forma controlada ha adquirido gran interés científico y tecnológico. Entre estos materiales, los hidrogeles elaborados a partir de polímeros naturales han destacado por su capacidad de absorción, biodegradabilidad y potencial aplicación en sistemas agrícolas sostenibles.

Uno de los estudios más antiguos reportados fue desarrollado utilizando residuos lignocelulósicos como la paja de arroz para producir hidrogeles de celulosa injertada con ácido acrílico [25]. Estos materiales presentaron capacidades de hinchamiento superiores al 3000 %, además de estructuras macroporosas favorables para la absorción y almacenamiento de agua. Su aplicación en cultivos de maíz bajo condiciones de salinidad y déficit hídrico permitió mejorar la eficiencia en el uso del agua y fertilizantes, demostrando el potencial de la biomasa agrícola como fuente de materiales funcionales para aplicaciones sustentables.

Posteriormente, los métodos de síntesis mediante irradiación gamma comenzaron a utilizarse ampliamente para la producción de hidrogeles agrícolas debido a que permiten inducir el entrecruzamiento sin necesidad de emplear iniciadores químicos tóxicos [26]. Investigaciones realizadas con poliacrilamida y polímeros naturales de bajo peso molecular demostraron que los hidrogeles obtenidos presentan elevada capacidad de absorción de agua y buena estabilidad estructural, lo cual favorece su aplicación como acondicionadores de suelo en regiones áridas y semiáridas.

Más adelante, diversas investigaciones demostraron que los hidrogeles pueden emplearse como sistemas eficientes de liberación controlada de pesticidas y reguladores de crecimiento vegetal. Se desarrollaron hidrogeles basados en CS y Alg capaces de encapsular insecticidas para el control de plagas en cultivos de maíz, utilizando procesos de entrecruzamiento iónico para formar matrices tridimensionales biodegradables [24]. Estos sistemas permitieron mejorar la eficiencia del insecticida y disminuir pérdidas por lixiviación, aumentando la disponibilidad del compuesto activo directamente en la planta.

Posteriormente, la incorporación de nanomateriales y componentes inorgánicos permitió mejorar las propiedades físicas y mecánicas de los hidrogeles agrícolas. Un ejemplo de ello fueron los hidrogeles formulados con carboximetilcelulosa y nano-carbonato de calcio, aplicados como acondicionadores en suelos cultivados con maíz [6]. Estos materiales incrementaron significativamente la capacidad de retención de agua y mejoraron propiedades estructurales del suelo, favoreciendo el crecimiento radicular, la biomasa y la altura de las plantas. La presencia de nano-carbonato de calcio también contribuyó al mejoramiento de la disponibilidad de calcio y estabilidad fisicoquímica del sistema.

En años más recientes, se diseñaron hidrogeles supramoleculares ecológicos elaborados con CS cuaternizado, laponita y CTAB (bromuro de cetiltrimetilamonio), destinados tanto a la liberación controlada de reguladores de crecimiento como a aplicaciones antifúngicas [12]. Estos materiales fueron sintetizados mediante autoensamblaje no covalente basado en interacciones electrostáticas y enlaces de hidrógeno. Dentro de la red hidrogel se encapsularon ácido naftalenacético y giberelina, obteniendo sistemas con liberación sostenida y elevada actividad antifúngica frente a hongos fitopatógenos. Además, los tratamientos promovieron el crecimiento de especies vegetales como col china y alfalfa, sin presentar toxicidad significativa en pruebas biológicas. Estos resultados demostraron que los hidrogeles supramoleculares pueden actuar simultáneamente como vehículos de liberación de agroquímicos, promotores de crecimiento y agentes antifúngicos, ofreciendo aplicaciones multifuncionales para la agricultura sostenible.

En esta misma línea, se desarrollaron hidrogeles ultra absorbentes basados en hidroxietil celulosa y acrilamida mediante irradiación gamma y posterior hidrólisis alcalina [18]. Estos materiales alcanzaron capacidades de absorción superiores a 1200 g/g y mostraron una liberación lenta de urea durante más de 22 días. Además, conservaron humedad en el suelo por periodos prolongados y mejoraron significativamente el crecimiento del maíz bajo condiciones de sequía, incrementando parámetros fisiológicos como contenido de clorofila y longitud del tallo. Los autores concluyeron que estos sistemas representan una alternativa eficiente para racionalizar el uso del agua y fertilizantes frente a escenarios de estrés hídrico asociados al cambio climático.

Más recientemente, se ha observado un incremento importante en investigaciones orientadas al uso de biopolímeros y materiales biodegradables para aplicaciones agrícolas. Dentro de estas investigaciones se encuentran los hidrogeles híbridos de Alg capaces de encapsular simultáneamente nanopartículas de zinc y bacterias promotoras del crecimiento vegetal (*Azospirillum brasilense*) [20]. Los sistemas fueron obtenidos mediante gelación iónica y mostraron elevada eficiencia de encapsulación y liberación controlada de micronutrientes y microorganismos. Los resultados demostraron mejoras en crecimiento radicular y absorción de zinc en maíz, indicando el potencial de integrar funciones biológicas y nutricionales en una sola matriz hidrogel.

De igual forma, se desarrollaron sistemas de doble red polimérica basados en acrilamida, CS y almidón modificado químicamente, los cuales mostraron alta capacidad de absorción de agua y liberación gradual de nitrógeno [27]. Estos materiales favorecieron el crecimiento de plantas de maíz, incrementando biomasa, altura y contenido de clorofila respecto a fertilizantes convencionales.

En relación con el manejo eficiente del fósforo, también se desarrollaron fertilizantes fosfatados de liberación controlada mediante recubrimientos biodegradables elaborados con almidón, lignina Kraft y óxido de grafeno [28]. En este estudio, los gránulos de triple superfosfato fueron recubiertos con biopelículas nanocompuestas capaces de regular la liberación gradual del fósforo y sincronizarla con la demanda nutrimental del cultivo. La incorporación de óxido de grafeno mejoró significativamente la resistencia mecánica y estabilidad del recubrimiento, además de favorecer una liberación más controlada del nutriente. Las pruebas en maíz mostraron mejoras en crecimiento y desarrollo vegetal, indicando una mayor eficiencia en el aprovechamiento del fósforo y una reducción potencial de pérdidas por lixiviación y fijación química.

Asimismo, se sintetizaron hidrogeles compuestos de Alg de sodio y almidón carbamato modificados para la encapsulación de urea [7]. La preparación se realizó mediante entrecruzamiento iónico con calcio, formando perlas de hidrogel con estructura porosa y elevada capacidad de almacenamiento de fertilizante. Los resultados mostraron una liberación lenta y sostenida de nitrógeno tanto en agua como en suelo, alcanzando periodos superiores a 50 días para la liberación completa. Además, las pruebas en macetas demostraron un crecimiento superior de plántulas de maíz respecto a tratamientos convencionales, evidenciando el potencial de estos sistemas como fertilizantes inteligentes biodegradables.

Paralelamente, el aprovechamiento de residuos agrícolas y subproductos orgánicos para la síntesis de hidrogeles ha sido considerado una estrategia sustentable para reducir costos y generar materiales biodegradables. Algunos estudios desarrollaron hidrogeles utilizando almidón proveniente de residuos de pan mediante copolimerización con monómeros sintéticos, obteniendo materiales con elevada capacidad de absorción de agua y liberación progresiva de nutrientes. Estos sistemas mejoraron la retención de humedad del suelo y aumentaron el rendimiento de cultivos de maíz [19].

Adicionalmente, se desarrollaron hidrogeles biodegradables basados en goma arábica modificada, acrilato y *N, N*-dimetilacrilamida con propiedades superabsorbentes y elevada estabilidad estructural [29]. Estos materiales mostraron buena capacidad de hidratación y resistencia a ciclos repetidos de absorción y secado, por lo que podrían emplearse como acondicionadores de suelo y sistemas de retención hídrica en zonas áridas. El uso de polisacáridos naturales como goma arábica permite disminuir la dependencia de polímeros derivados del petróleo y favorece la biodegradabilidad de los materiales.

Por otro lado, algunos estudios también han señalado posibles efectos negativos asociados al uso de polímeros superabsorbentes sintéticos. Se ha reportado que ciertos polímeros basados en acrilatos pueden inhibir el crecimiento de plántulas de maíz, alterar la morfología radicular y generar estrés oxidativo debido a la liberación de ácido acrílico y altas concentraciones de sodio. Estos hallazgos resaltan la importancia de optimizar la composición y concentración de los hidrogeles agrícolas para evitar efectos fitotóxicos y garantizar su seguridad ambiental [30].

En conjunto, los antecedentes revisados evidencian que los hidrogeles basados en biopolímeros naturales constituyen materiales altamente prometedores para aplicaciones agrícolas relacionadas con la retención de agua, liberación controlada de nutrientes y agroquímicos, acondicionamiento de suelos y mejora del crecimiento vegetal. Asimismo, el uso de residuos agroindustriales y polisacáridos biodegradables permite desarrollar tecnologías más sostenibles y amigables con el ambiente. Sin embargo, aún es necesario continuar investigando nuevas formulaciones que combinen elevada eficiencia agronómica, estabilidad estructural, biodegradabilidad y baja toxicidad, con el fin de optimizar su aplicación en cultivos de importancia agrícola como el maíz.

Con base en lo anterior, la presente investigación se realiza debido a la necesidad de desarrollar hidrogeles biodegradables capaces de mejorar la retención de agua y favorecer la liberación controlada de nutrientes en cultivos agrícolas. Además, considerando las problemáticas actuales relacionadas con el estrés hídrico, el uso excesivo de fertilizantes convencionales y el impacto ambiental asociado a estas prácticas, resulta importante evaluar nuevas formulaciones basadas en polímeros naturales que permitan mejorar el desarrollo vegetal y contribuir a una agricultura más eficiente y sustentable.

III. JUSTIFICACIÓN

La eficiencia en el uso del agua representa uno de los principales retos en la agricultura actual, particularmente durante etapas tempranas del desarrollo vegetal, donde la disponibilidad hídrica condiciona directamente la germinación y el establecimiento de las plántulas. En este sentido, el desarrollo de materiales capaces de regular la disponibilidad de agua en el entorno inmediato de la semilla constituye una estrategia relevante para mejorar las condiciones de crecimiento [1-4].

Los hidrogeles basados en polímeros naturales ofrecen una alternativa viable debido a su capacidad de interactuar con el agua y modificar su disponibilidad en sistemas biológicos. Además, la modificación química de estos materiales permite ajustar sus propiedades estructurales y funcionales, lo que abre la posibilidad de diseñar sistemas con comportamientos específicos [5-9].

El uso combinado de CS y AlgOx permite la formación de redes poliméricas mediante enlaces covalentes, mientras que la incorporación de MD puede influir en la organización interna del material y su interacción con el agua. Estas variaciones estructurales pueden traducirse en diferencias en el desempeño del hidrogel cuando es aplicado en sistemas biológicos [10-16].

Por lo tanto, evaluar el comportamiento de hidrogeles con distinta composición, bajo condiciones controladas de germinación, permite no sólo determinar su efecto sobre el desarrollo inicial del maíz, sino también entender cómo las propiedades del material influyen en la respuesta vegetal. Este conocimiento resulta clave para el diseño de materiales con aplicaciones agrícolas más eficientes.

IV. HIPÓTESIS

Es posible la preparación de hidrogeles basados en Alg, CS y MD con capacidad de retención de agua, los cuales tendrán un efecto sobre la germinación y el crecimiento vegetal de plántulas de maíz.

V. OBJETIVOS

5.1. Objetivo general

Sintetizar y caracterizar hidrogeles basados en sistemas binario (CS/AlgOx) y ternario (MD-CS)/Alg, y evaluar su efecto sobre la germinación y el crecimiento vegetal en plántulas de maíz.

5.2. Objetivos específicos

- 1) Obtener AlgOx mediante un proceso de oxidación controlada, con el fin de introducir grupos funcionales reactivos.
- 2) Sintetizar hidrogeles a partir de CS y AlgOx mediante una reacción de base de Schiff.
- 3) Sintetizar hidrogeles ternarios conteniendo MD, CS y Alg mediante polimerización vía radicales libres y reticulación química.
- 4) Caracterizar los hidrogeles obtenidos mediante técnicas fisicoquímicas como espectroscopía FTIR y análisis TGA, con el fin de evaluar su estructura y estabilidad térmica.
- 5) Evaluar la capacidad de absorción y retención de agua de los hidrogeles, mediante pruebas de hinchamiento.
- 6) Analizar el efecto de diferentes concentraciones de los hidrogeles sintetizados (50, 100, 150, 200 y 300 ppm) sobre la germinación de semillas de maíz de la variedad ratón.
- 7) Determinar parámetros de crecimiento vegetal, incluyendo porcentaje de germinación, longitud de raíz, longitud de plúmula, peso fresco, peso seco y contenido de agua de las plántulas de maíz.

VI. METODOLOGÍA

El experimento se desarrolló en las instalaciones del Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), en los Departamentos de Procesos de Polimerización y Materiales Avanzados, donde se llevó a cabo la síntesis de los hidrogeles, así como en el laboratorio del área de Agrotecnología y Biotecnología, donde se realizaron los ensayos de germinación y evaluación biológica.

6.1. Síntesis del hidrogel de CS/AlgOx

6.1.1. Preparación de AlgOx

El AlgOx se obtuvo mediante oxidación controlada. Se disolvieron 3 g de Alg de sodio en 150 mL de agua ultrapura bajo agitación constante hasta obtener una solución homogénea al 2 % (p/v). Posteriormente, se añadió gota a gota una solución de peryodato de sodio (3 g en 10 mL), manteniendo la reacción en condiciones de oscuridad durante 72 h a temperatura ambiente. Una vez concluida la reacción, se agregó etilenglicol (2 mL) para detener la oxidación. Posteriormente, se añadió cloruro de sodio (1 g) y la solución fue purificada mediante diálisis (MWCO 14,000 Da) durante 3 días. Finalmente, el producto se secó mediante liofilización a $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 72 h.

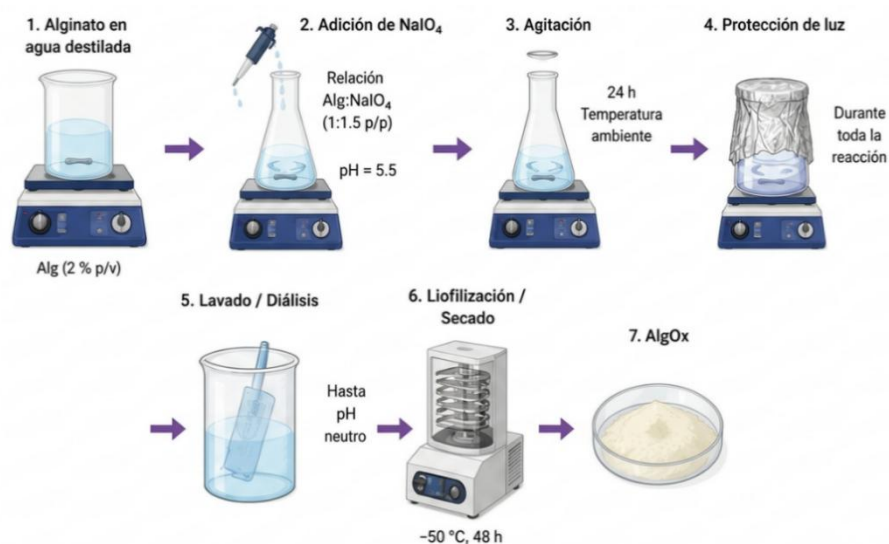


Figura 7. Procedimiento experimental de la síntesis de AlgOx

6.1.2. Reacción de polimerización para obtener el hidrogel CS/AlgOx

Se disolvieron 250 mg de CS en 10 mL de una solución acuosa de ácido acético al 0.5 % (v/v) hasta su completa disolución. Paralelamente, se disolvieron 150 mg de AlgOx en 5 mL de solución tampón de fosfato (PBS, pH 7.4). La solución de AlgOx se añadió lentamente a la solución de CS bajo agitación constante a 37 °C, permitiendo la formación del hidrogel mediante reacciones tipo base de Schiff. El hidrogel formado fue centrifugado y lavado tres veces con agua destilada. Posteriormente, se congeló y liofilizó durante 72 h, hasta obtener un polvo.

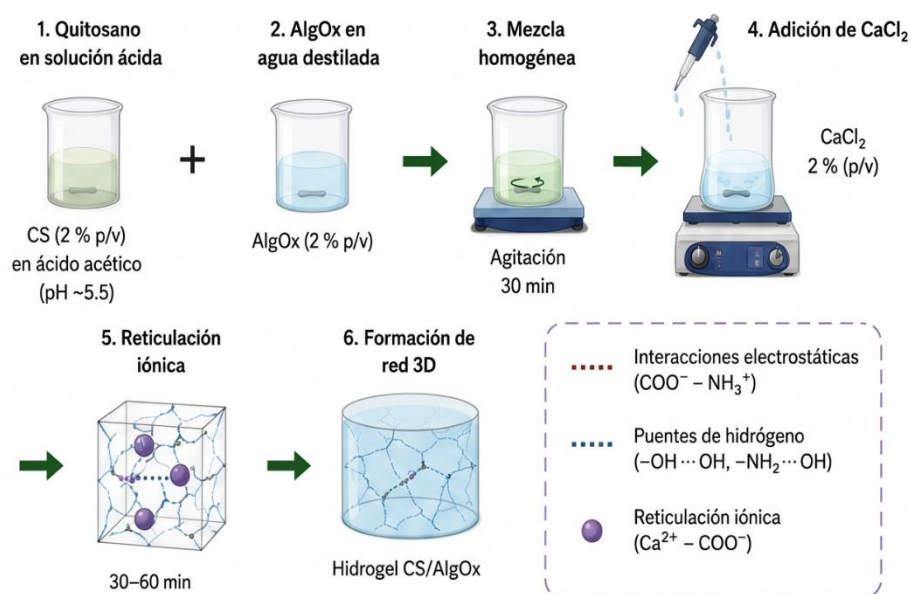


Figura 8. Procedimiento experimental de la síntesis del hidrogel CS/AlgOx

6.2. Síntesis de hidrogel ternario (MD-CS) /Alg

Primeramente, un copolímero de MD-CS (2 g) previamente obtenido sin entrecruzante siguiendo la metodología reportada por Macías-Encina [35], fue disuelto en 100 mL de una solución de ácido acético al 2% (p/v). De manera independiente, se preparó una solución de Alg de sodio (2 g en 100 mL de agua destilada), la cual se agitó durante 3 h a temperatura ambiente.

Entonces la solución de Alg se agregó gota a gota a la solución de MD-CS en una proporción 30:70 (Alg: MD-CS, v/v), manteniendo agitación a 500 rpm durante 10 min. Posteriormente, se añadió 1 mL de solución de CaCl₂ al 1% (p/v) gota a gota hasta inducir la gelificación de la

mezcla de reacción. El hidrogel formado se lavó con agua destilada tres veces y se liofilizó durante 72 h.

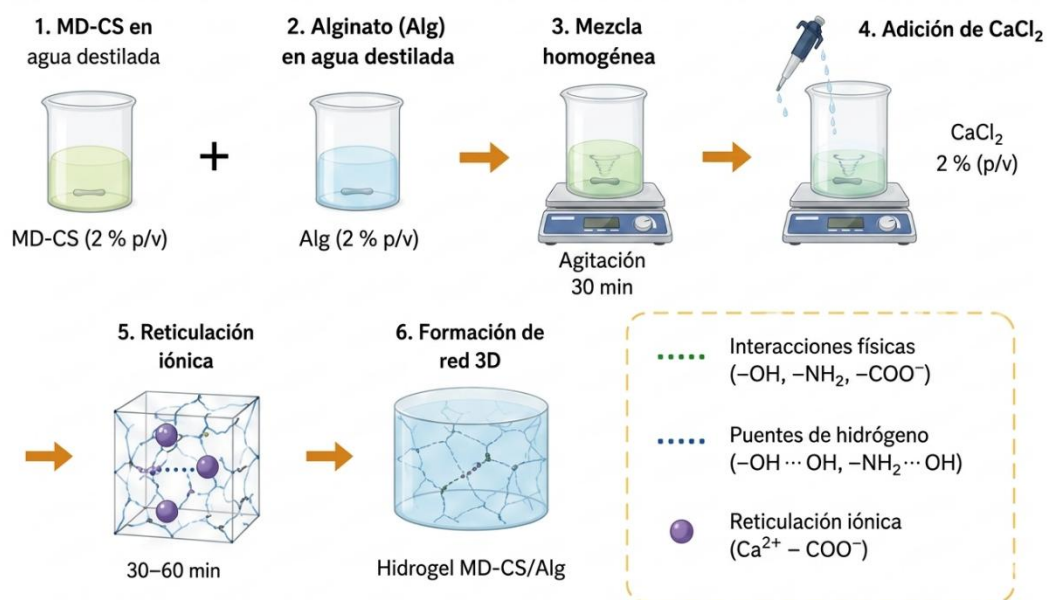


Figura 9. Procedimiento experimental de la síntesis del hidrogel (MD-CS) /Alg

6.3. Caracterización del hidrogel CS/AlgOx y (MD/CS) /Alg

6.3.1. Espectroscopia de FTIR

La caracterización química de los materiales sintetizados se realizó mediante FTIR, con el objetivo de identificar los grupos funcionales presentes y evaluar las posibles interacciones químicas generadas durante la formación de los hidrogeles.

Para el análisis, las muestras previamente secadas fueron acondicionadas y analizadas en un espectrómetro FTIR Nicolet Magna 550. Los espectros fueron registrados en un rango de número de onda de 4000 a 400 cm⁻¹, utilizando una resolución adecuada para obtener señales claramente definidas.

Posteriormente, los espectros obtenidos fueron analizados mediante la identificación de bandas características asociadas a los grupos funcionales presentes en cada componente del sistema, así

como posibles desplazamientos, disminución o aparición de señales relacionadas con la interacción entre polímeros y la formación de la red hidrogel. Los resultados permitieron comparar las muestras individuales y los materiales obtenidos después del proceso de síntesis para confirmar cambios estructurales y la formación del material final.



Figura 10. Procedimiento experimental de FTIR para los hidrogeles de CS/AlgOx y (MD-CS) /Alg

6.3.2. Análisis de TGA

El comportamiento térmico y la estabilidad de los materiales sintetizados se evaluaron mediante TGA. Esta técnica permitió determinar la pérdida de masa en función del incremento de temperatura e identificar eventos asociados con deshidratación, degradación térmica y descomposición de los componentes presentes en los hidrogeles.

Para el análisis, las muestras previamente secadas fueron colocadas en crisoles adecuados y sometidas a un termoanalizador TGA Q500 (TA Instruments) bajo una atmósfera controlada de nitrógeno desde temperatura ambiente hasta 800 °C a una velocidad de calentamiento de 10 °C min⁻¹.

Las curvas termogravimétricas obtenidas se analizaron considerando las etapas de pérdida de masa y los intervalos de temperatura asociados a cada evento térmico. A partir de estos resultados fue posible determinar la estabilidad térmica de los hidrogeles y comparar el efecto de la composición polimérica sobre el comportamiento de degradación de cada sistema

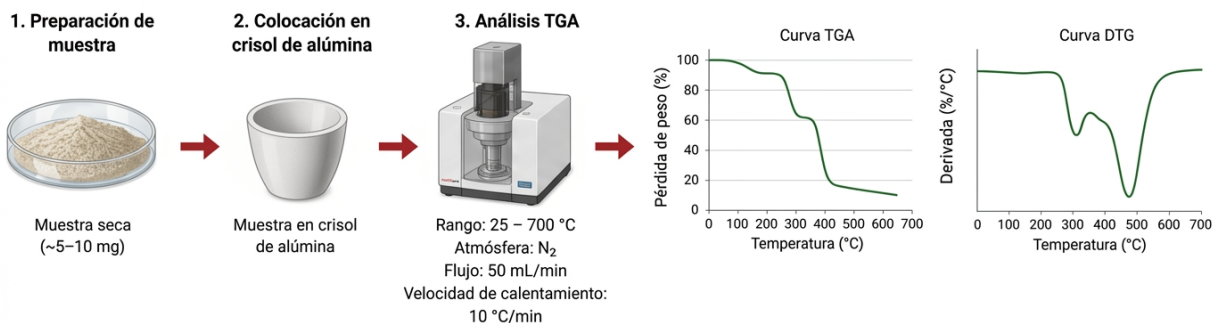


Figura 11. Procedimiento experimental de TGA para los hidrogeles de CS/AlgOx y (MD-CS)/Alg

6.4. Pruebas de hinchamiento

Se realizaron pruebas de hinchamiento con el propósito de evaluar la capacidad de absorción y retención de agua de ambos de los hidrogeles sintetizados. Para ello, las muestras previamente secadas fueron pesadas para obtener su masa inicial y posteriormente se colocaron en agua desionizada a temperatura ambiente durante intervalos de tiempo definidos.

Al concluir cada intervalo, los hidrogeles se retiraron del medio, se eliminó cuidadosamente el exceso de agua superficial y se registró nuevamente su masa correspondiente al estado hinchado. Después del pesaje, las muestras fueron reintroducidas en el agua para continuar con el seguimiento del proceso de absorción hasta completar el tiempo de análisis establecido (3-10 min. correspondientemente).

Con los datos obtenidos se construyeron curvas de porcentaje de hinchamiento en función del tiempo (Figura 12), permitiendo identificar el comportamiento de absorción de cada sistema. El tiempo límite de hinchamiento se determinó considerando el punto en el cual el porcentaje de hinchamiento alcanzó valores constantes o presentó cambios mínimos entre mediciones consecutivas, indicando el establecimiento del equilibrio de absorción de agua.

El porcentaje de hinchamiento (%H) se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\% H = \frac{W_s - W_0}{W_0} \times 100$$

Donde:

(Ws) = masa del hidrogel en estado hinchado (g).

(W₀) = masa inicial del hidrogel seco (g).

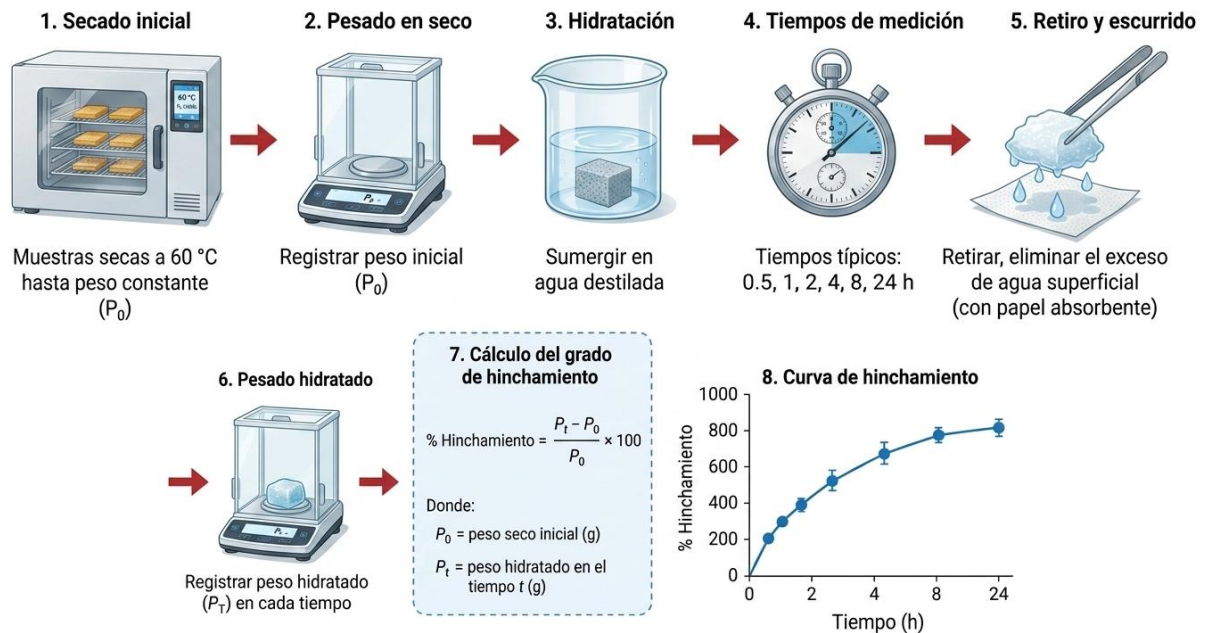


Figura 12. Procedimiento experimental de pruebas de hinchamiento para los hidrogeles de CS/AlgOx y (MD-CS) /Alg

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

6.5.1. Preparación de las dispersiones de hidrogeles de CS/AlgOx y (MD-CS) /Alg

Primeramente, las muestras del hidrogel correspondiente fueron sometidas a un proceso de molienda con el fin de reducir el tamaño de partícula y facilitar su dispersión en medio acuoso. Posteriormente, una cantidad determinada de muestra de estos hidrogeles fueron dispersados en agua destilada hasta un volumen de 100 mL para obtener concentraciones de 50, 100, 150, 200 y 300 ppm. Las dispersiones se mantuvieron en un rango de pH entre 5 y 6.

Se evaluaron los dos sistemas de hidrogeles de manera independiente. En ambos casos se aplicó la misma metodología experimental, variando únicamente el tipo de hidrogel y las concentraciones empleadas.

Los tratamientos correspondientes a cada sistema se presentan en las Tablas 1 y 2.

Tabla 1. Tratamientos aplicados al sistema binario CS/AlgOx.

Tratamiento 1	Agua destilada (Control)
Tratamiento 2	CS/AlgOx 50 ppm
Tratamiento 3	CS/AlgOx 100 ppm
Tratamiento 4	CS/AlgOx 150 ppm
Tratamiento 5	CS/AlgOx 200 ppm
Tratamiento 6	CS/AlgOx 300 ppm

Tabla 2. Tratamientos aplicados al sistema ternario (MD-CS) /Alg.

Tratamiento 1	Agua destilada (Control)
Tratamiento 2	(MD-CS) /Alg 50 ppm
Tratamiento 3	(MD-CS) /Alg 100 ppm
Tratamiento 4	(MD-CS) /Alg 150 ppm
Tratamiento 5	(MD-CS) /Alg 200 ppm
Tratamiento 6	(MD-CS) /Alg 300 ppm

6.5.2. Preparación y desinfección de semillas

Las semillas de maíz fueron sometidas a un proceso de desinfección previo, el cual consistió en un tratamiento con etanol al 70 %, seguido de una solución de hipoclorito de sodio al 10 %. Posteriormente, se realizaron enjuagues con agua destilada para eliminar residuos de los agentes desinfectantes. Adicionalmente, las semillas fueron colocadas en agitación a 60 rpm con el tratamiento a las diferentes concentraciones durante un periodo de 20 a 22 h previo a su establecimiento en el sistema de germinación.

6.5.3. Preparación del sistema de germinación

El área de trabajo fue previamente desinfectada utilizando una solución de cloro al 3 % y jabón, seguida de la aplicación de etanol. Las bandejas de germinación fueron lavadas con agua y jabón, con un enjuague final empelando agua desionizada. Posteriormente, las bandejas se colocaron sobre la mesa de trabajo junto con agua destilada estéril.

Se utilizó papel de germinación tipo Anchor esterilizado, el cual fue humedecido con agua destilada estéril, eliminando el exceso de humedad.

6.5.4. Siembra y establecimiento del experimento

El papel de germinación se colocó extendido sobre la superficie de trabajo. Se distribuyeron 25 semillas por unidad experimental utilizando pinzas, manteniendo una separación uniforme entre ellas. Entonces, las semillas se alinearon cuidadosamente para facilitar su evaluación posterior. Subsiguientemente, se colocó una segunda hoja de papel de germinación previamente humedecida sobre las semillas, cubriéndolas completamente.

6.5.5. Formación de unidades experimentales (“tacos”)

Una vez cubiertas las semillas, se realizó un ligero sellado manual y se procedió a doblar el papel formando estructuras tipo “taco”. Enseguida, cada unidad experimental fue introducida

en bolsas de plástico, las cuales fueron etiquetadas con la concentración correspondiente y el número de repetición. Se realizaron cuatro repeticiones por tratamiento, incluyendo el control, para cada una de las concentraciones evaluadas (50, 100, 150, 200 y 300 ppm).

6.5.6. Condiciones de incubación

Las unidades experimentales fueron colocadas en condiciones controladas, manteniéndose inicialmente en una incubadora Thermo Scientific a 25 °C durante 7 días para favorecer el inicio de la germinación. Durante el experimento, se monitoreó la humedad del sistema, observándose que los tratamientos con hidrogeles requerían menor adición de agua en comparación con el control.

6.5.7. Evaluación del crecimiento y determinación de contenido de agua

El desarrollo de las semillas fue monitoreado a lo largo del experimento, realizando una primera revisión a los 4 días después de la siembra, con el fin de verificar el proceso de germinación y las condiciones generales de las unidades experimentales. Posteriormente, a los 7 días, las plántulas fueron retiradas del sistema de germinación para llevar a cabo las mediciones correspondientes. Se determinó la longitud de la raíz y la plúmula utilizando una regla milimétrica, registrando los valores individuales para cada tratamiento.

Una vez realizadas las mediciones, las plántulas fueron pesadas para obtener el peso fresco. El procedimiento experimental completo de las pruebas de germinación se presenta en el Anexo (Figura A1). Posteriormente, las muestras se colocaron en bolsas de papel tipo Kraft (papel café) y se introdujeron en una estufa de secado a 60 °C durante 24 h, con el objetivo de eliminar el contenido de humedad. Transcurrido este tiempo, se registró el peso seco de las muestras. El contenido de agua se calculó a partir de la diferencia entre el peso fresco y el peso seco, expresado como porcentaje, utilizando la siguiente relación:

$$\% \text{ de agua} = \frac{\text{peso fresco} - \text{peso seco}}{\text{peso fresco}} \times 100$$

VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Síntesis y caracterización del hidrogel de CS/AlgOx

Los resultados de síntesis y caracterización confirmaron la oxidación exitosa del Alg y la adecuada formación del hidrogel binario. Asimismo, los análisis realizados mostrados a continuación evidenciaron los cambios estructurales y térmicos asociados a la interacción entre ambos polímeros, indicando la formación de una red polimérica estable.

7.1.1. Espectroscopia de FTIR del AlgOx

El análisis por FTIR del AlgOx mostrado en la Figura 13 evidenció cambios estructurales significativos en comparación con el Alg sin modificar. En particular, se observa la aparición de una banda alrededor de 1720 cm^{-1} , atribuida a la vibración de grupos carbonilo (C=O) correspondientes a grupos aldehído generados durante el proceso de oxidación. Esta señal no está presente en el Alg original, lo que confirma que la modificación química fue exitosa [21-36]

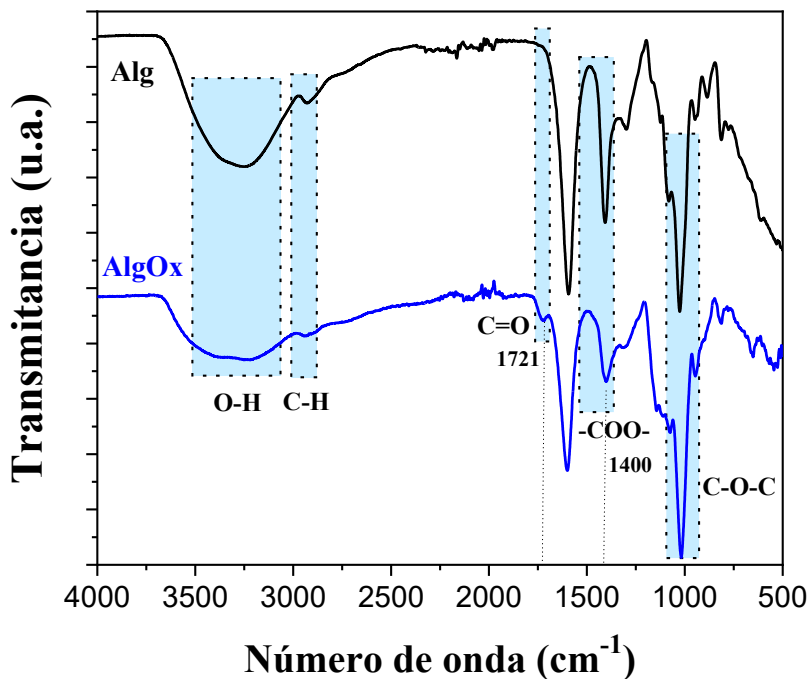


Figura 13. Espectros de FTIR de Alg y AlgOx.

Adicionalmente, en el espectro de AlgOx se presentan ligeras variaciones en la región de 1600-1400 cm^{-1} , asociadas a los grupos carboxilato ($-\text{COO}^-$), lo que sugiere cambios en el entorno químico del polímero debido a la apertura de los anillos de las unidades de ácido urónico. Estos cambios estructurales son característicos de procesos de oxidación con peryodato, donde ocurre la ruptura de enlaces C-C y la formación de grupos dialdehído.

En la región de 1000-1100 cm^{-1} , correspondiente a enlaces C-O-C, se observan modificaciones en la intensidad de las bandas, lo cual indica alteraciones en la estructura del polisacárido del Alg [36,22]. En conjunto, estos resultados confirman la introducción de grupos funcionales reactivos que permiten la posterior formación de enlaces covalentes con otros polímeros, como el CS.

7.1.2. Análisis de TGA del AlgOx

Por otra parte, se llevaron a cabo estudios de TGA para las muestras de Alg y AlgOx (Figura 14). De esta imagen se puede observar principalmente que el AlgOx presentó una disminución en su estabilidad térmica en comparación con el Alg sin modificar.

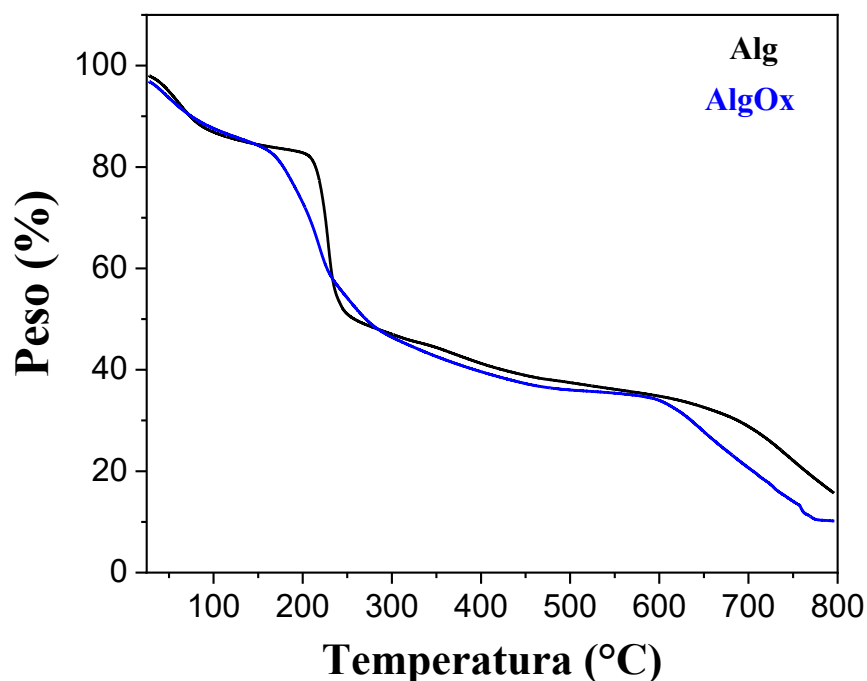


Figura 14. Curvas termogravimétricas TGA de Alg y AlgOx

Esta reducción en la estabilidad térmica puede atribuirse a la ruptura parcial de la estructura polimérica durante el proceso de oxidación, lo que genera una cadena más susceptible a la degradación térmica. Asimismo, la introducción de grupos aldehído incrementa la reactividad del material, pero disminuye su resistencia estructural [37].

Particularmente, para el Alg sin modificar se presenta una degradación principal en el rango de 200-250 °C mientras que el AlgOx esta se muestra en el rango de 170-280 °C, lo cual confirma la disminución de su estabilidad térmica después del proceso de oxidación. Igualmente, se observa una pérdida de masa por debajo de 150 °C tanto para Alg y AlgOx, la cual es atribuida a la eliminación de agua físicamente adsorbida [37,38].

En conjunto, los resultados obtenidos confirman que el proceso de oxidación del Alg fue efectivo, generando un material con grupos funcionales activos (aldehídos) capaces de participar en reacciones de reticulación. Aunque esta modificación implica una disminución en la estabilidad térmica, proporciona ventajas importantes en términos de reactividad química, lo cual es fundamental para la formación de hidrogeles mediante enlaces tipo base de Schiff.

Las curvas de la derivada de los termogramas (DTG) de las muestras de Alg y AlgOx permitieron identificar con mayor precisión las etapas de degradación térmica de estos polímeros (Figura 15). Para el AlgOx, se observó un primer pico a bajas temperaturas (185 °C), asociado a la pérdida de agua adsorbida. Posteriormente, se presentó una cúspide principal a una temperatura de 220 °C correspondiente a la degradación de la estructura polimérica [38].

En comparación con el Alg sin modificar (228 °C), este pico se presentó a menores temperaturas y con mayor intensidad, lo que indica una disminución en la estabilidad térmica del material. Este comportamiento se atribuye a la ruptura parcial de la cadena polimérica durante el proceso de oxidación y a la introducción de grupos aldehído, los cuales incrementan la reactividad del material, pero lo hacen más susceptible a la degradación térmica.

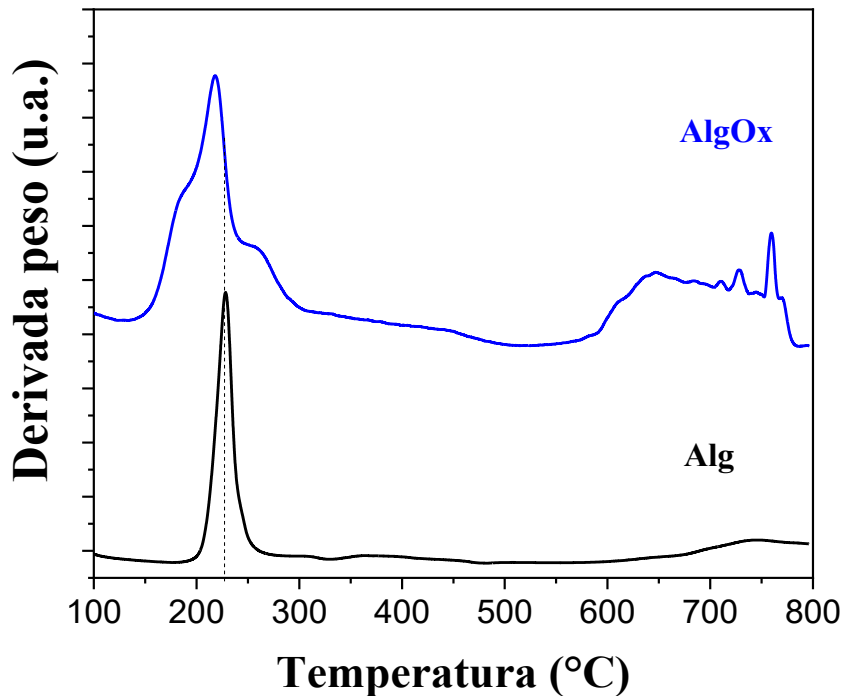


Figura 15. Curvas de DTG de Alg y AlgOx

7.1.3. Espectroscopia de FTIR del hidrogel CS/AlgOx

Los espectros de FTIR del hidrogel CS/AlgOx, incluyendo aquellos para el CS y AlgOx se exponen en la Figura 16.

En el espectro de AlgOx se observa la banda característica alrededor de 1720 cm^{-1} , atribuida a los grupos carbonilo (C=O) de los aldehídos generados durante la oxidación. Por su parte, el CS presenta una banda amplia entre 3663 a 3028 cm^{-1} , atribuida a las vibraciones de estiramiento de los grupos hidroxilo (O-H) y amino ($-\text{NH}_2$). Asimismo, las señales observadas alrededor de 2969 y 2853 cm^{-1} se relacionan con las vibraciones de estiramiento de los enlaces alifáticos C-H. También se identificaron bandas características correspondientes a los grupos amida, donde la señal ubicada en 1647 cm^{-1} se asocia con la vibración del estiramiento del carbonilo de amida I, mientras que la banda en 1558 cm^{-1} corresponde a la flexión N-H de amida II. De igual manera, la banda localizada en 1375 cm^{-1} fue atribuida al estiramiento combinado de N-H/C-N de amida III [8,39].

Por otra parte, se observaron picos intensos en la región de 1150 a 1020 cm^{-1} , los cuales indican la presencia de enlaces glucosídicos C-O-C y grupos C-O característicos de las unidades *D*-glucosa presentes en la estructura del CS.

De otro modo, en el espectro del hidrogel CS/AlgOx, se puede observar la banda correspondiente a los grupos carbonilo disminuye en intensidad o presenta ligeros desplazamientos, mientras que aparece o se intensifica una señal alrededor de 1600 cm^{-1} . Este cambio se asocia a la formación de enlaces tipo base de Schiff (C=N), resultado de la reacción entre los grupos amino del CS y los grupos aldehído del AlgOx [40].

Asimismo, se observan modificaciones en la región de 1400-1000 cm^{-1} , relacionadas con vibraciones de enlaces C-O y C-O-C, lo que indica una reorganización estructural de la red polimérica. En conjunto, estos cambios confirman la formación de un sistema reticulado y no solo una mezcla física de los componentes [41].

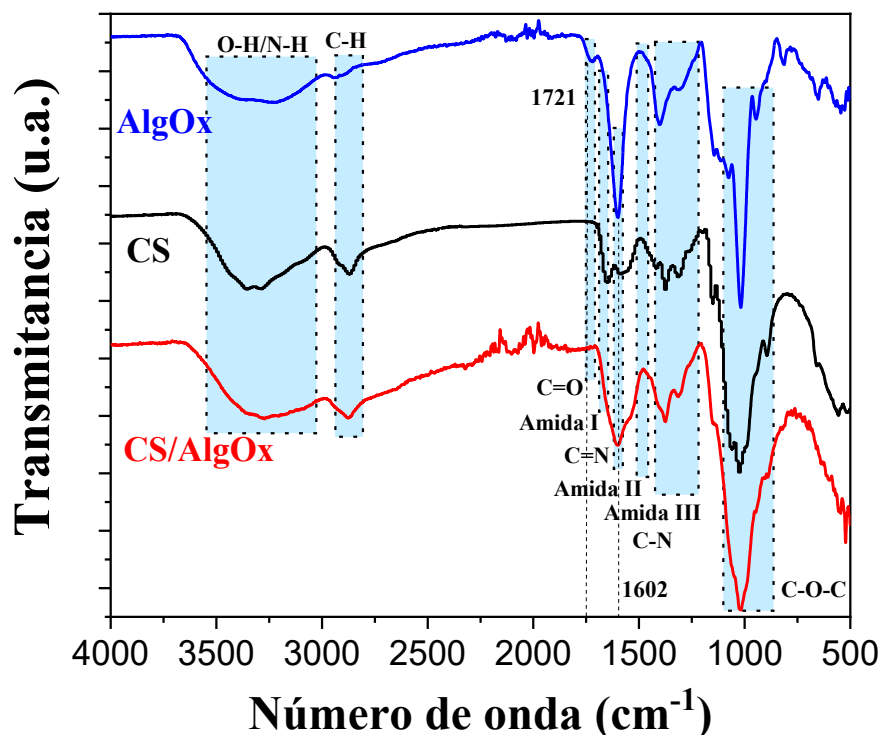


Figura 16. Espectros de FTIR del CS y Alg iniciales, incluyendo el hidrogel CS/AlgOx.

7.1.4. Análisis de TGA del hidrogel CS/AlgOx

En cuanto al análisis de TGA, el hidrogel CS/AlgOx mostró un comportamiento térmico distinto al de sus componentes individuales (Figura 17). Para este hidrogel, se observó una primera pérdida de masa por debajo de 150 °C, atribuida a la evaporación del agua adsorbida [42].

La degradación principal ocurrió entre 200 y 350 °C, donde se superponen los procesos de descomposición del CS y el AlgOx. Sin embargo, el hidrogel presenta una degradación más gradual e intermedia en comparación con los polímeros prístinos, lo que sugiere formación de la red polimérica entre el AlgOx y CS.

Por otro lado, a temperaturas más altas, se observó que la pérdida de masa continúa de manera progresiva, lo que indica la descomposición de residuos carbonosos del hidrogel CS/AlgOx. En general, el comportamiento térmico del hidrogel confirma la interacción entre los componentes y la formación de una estructura con propiedades distintas a las de los materiales individuales [8].

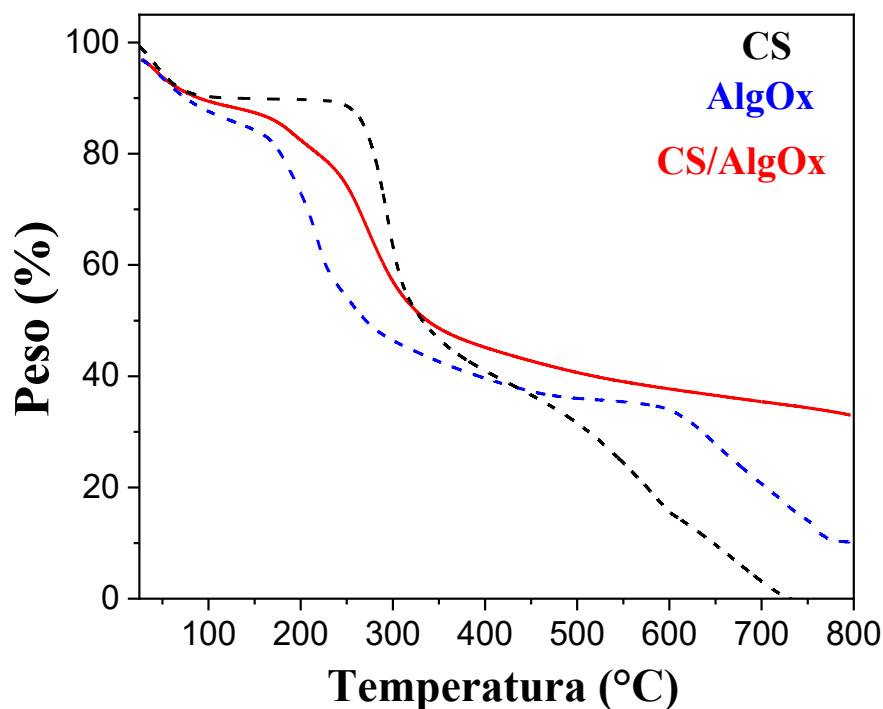


Figura 17. Curvas de TGA de CS, AlgOx y del hidrogel CS/AlgOx

Continuando, las curvas de DTG para este hidrogel y sus componentes de partida son presentadas en la Figura 18. El análisis de DTG del hidrogel CS/AlgOx, mostró un pico inicial a bajas temperaturas (50 °C) asociada a la pérdida de humedad, seguido de un pico en 190 °C y un principal en 280 °C correspondientes a la degradación de las cadenas poliméricas del AlgOx y CS, respectivamente, lo que confirma la síntesis de este hidrogel [43].

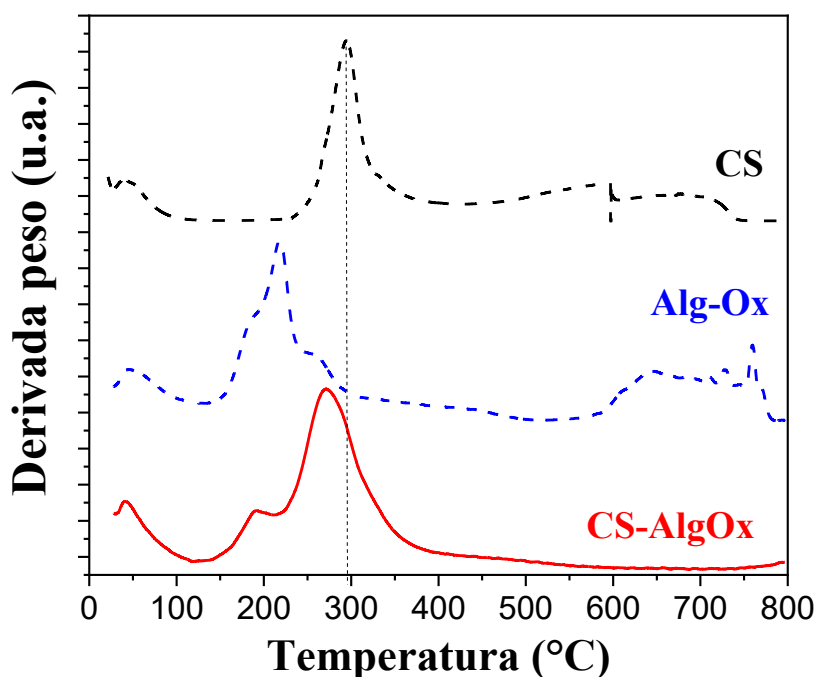


Figura 18. Curvas de DTG correspondientes al CS, AlgOx y el hidrogel CS/AlgOx

7.1.5. Pruebas de hinchamiento del hidrogel CS/AlgOx

Los resultados obtenidos en la prueba mostraron un incremento rápido en la absorción de agua durante los primeros minutos del ensayo, alcanzando porcentajes de hinchamiento cercanos al equilibrio en un periodo relativamente corto (Figura 19). Posteriormente, el sistema presentó un comportamiento estable, manteniéndose con variaciones mínimas a lo largo del tiempo. Este comportamiento sugiere que el hidrogel posee una red polimérica estructuralmente estable, capaz de absorber y retener grandes cantidades de agua sin sufrir colapso significativo.

La elevada capacidad de hinchamiento observada puede atribuirse a la presencia de grupos hidrofílicos en ambas macromoléculas. El CS contiene grupos amino e hidroxilo, mientras que

el AlgOx aporta grupos carboxilo y aldehído, los cuales favorecen la interacción con las moléculas de agua mediante la formación de enlaces de hidrógeno. Asimismo, la oxidación del Alg permite la formación de enlaces tipo base de Schiff entre los grupos aldehído y los grupos amino del CS, originando una red tridimensional con mayor grado de reticulación y estabilidad estructural.

El comportamiento relativamente constante después de alcanzar el equilibrio de hinchamiento indica que la red polimérica fue capaz de mantener la integridad del material durante el ensayo. Esto puede relacionarse con una adecuada densidad de reticulación, la cual limita la disolución o deformación excesiva de las cadenas poliméricas al entrar en contacto con el medio acuoso. Diversos estudios han reportado que los sistemas basados en CS y Alg presentan una elevada afinidad por el agua y buena estabilidad debido a las interacciones electrostáticas y covalentes generadas entre ambos polímeros.

La capacidad del hidrogel binario para absorber y retener agua representa una característica importante para aplicaciones agrícolas, ya que materiales con estas propiedades pueden contribuir a mantener la humedad del suelo durante periodos prolongados, favoreciendo la disponibilidad de agua para las semillas o cultivos. Además, la estabilidad observada en el sistema indica que el hidrogel podría soportar ciclos de hidratación sin perder rápidamente su funcionalidad estructural.

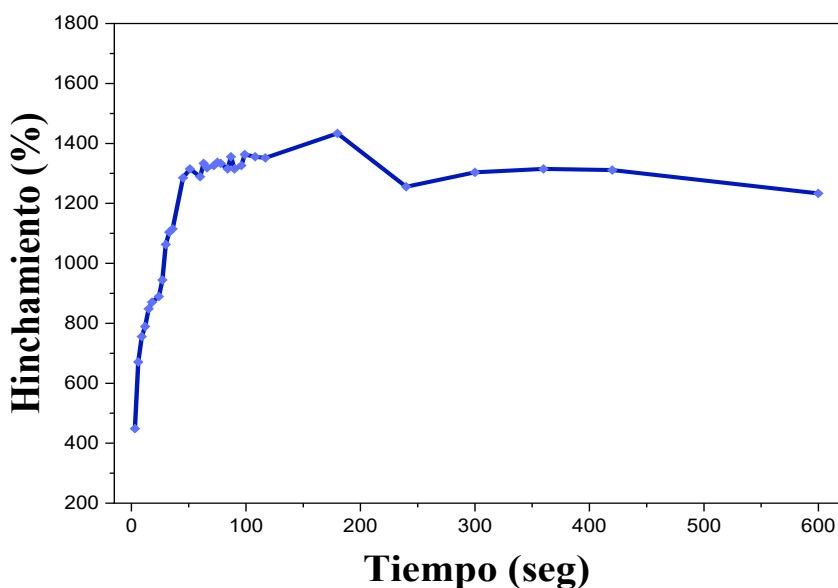


Figura 19. Pruebas de hinchamiento del hidrogel CS/AlgOx

7.2. Síntesis y caracterización del hidrogel (MD-CS) /Alg

La formación del hidrogel ternario de (MD-CS) /Alg fue posible gracias a la interacción física de los grupos amino provenientes del CS con los grupos COOH del Alg. Además de estas interacciones la formación de este hidrogel sugiere el establecimiento de puentes de hidrógeno entre los grupos hidroxilo presentes tanto en las estructuras químicas de MD-CS como en el Alg. Asimismo, la presencia de CaCl_2 fue determinante para la formación de la red tridimensional (3D) debido a la formación de enlaces iónicos entre los iones de calcio (Ca^{2+}) y los grupos carboxilato del Alg, favoreciendo el entrecruzamiento de las cadenas poliméricas y proporcionando mayor estabilidad estructural, confirmando la integración adecuada de los polímeros y la exitosa formación del hidrogel.

7.2.1. Espectroscopia de FTIR del hidrogel (MD-CS) /Alg

Los espectros de FTIR del hidrogel ternario (MD-CS) /Alg, así como de los materiales de partida para su formación son mostrados en la Figura 20.

El espectro de MD-CS presentó una banda amplia en la región de 3600 y 3000 cm^{-1} , atribuida a las vibraciones de estiramiento de los grupos hidroxilo (-OH) presentes tanto en la MD como en el CS, así como a los grupos amino (N-H) característicos del CS [44]. La amplitud de esta banda sugiere la presencia de interacciones intermoleculares mediante puentes de hidrógeno entre ambos polisacáridos. Asimismo, se observaron señales alrededor de 2920 y 2850 cm^{-1} , asociadas a las vibraciones de estiramiento de enlaces alifáticos C-H. En la región cercana a 1650 cm^{-1} se identificó una banda correspondiente al grupo amida I del CS, atribuida principalmente al estiramiento del grupo carbonilo (C=O), mientras que la señal alrededor de $1550\text{-}1580\text{ cm}^{-1}$ se relacionó con la flexión N-H de amida II.

Adicionalmente, en la región comprendida entre 1150 y 1000 cm^{-1} se observaron bandas intensas asociadas a vibraciones de enlaces glucosídicos C-O-C y grupos C-O, característicos de las unidades de glucosa presentes en la MD y el CS. Estas señales son típicas de polisacáridos y confirman la presencia de estructuras ricas en grupos hidroxilo.

Por otro lado, el espectro de Alg reveló una banda amplia alrededor de 3400 cm^{-1} correspondiente a los grupos hidroxilo (O-H), además de señales en 2920 cm^{-1} asociadas a enlaces C-H. Las bandas localizadas aproximadamente en 1600 y 1410 cm^{-1} fueron atribuidas a las vibraciones asimétricas y simétricas de los grupos carboxilato ($-\text{COO}^-$), respectivamente. Asimismo, en la región de $1100\text{-}1000\text{ cm}^{-1}$ se identificaron señales relacionadas con vibraciones de enlaces C-O y C-O-C presentes en las unidades polisacarídicas del Alg.

En el espectro correspondiente al hidrogel ternario (MD-CS) /Alg se observaron bandas características provenientes del MD-CS y del Alg en las regiones de 1710 y $1600/1410\text{ cm}^{-1}$, respectivamente. Además, se observaron modificaciones en la intensidad y forma de las bandas respecto a los componentes individuales, particularmente en la región de grupos hidroxilo y enlaces glucosídicos. El ensanchamiento de la banda O-H/N-H y los cambios observados entre $1400\text{-}1000\text{ cm}^{-1}$ sugieren la existencia de interacciones intermoleculares entre los componentes del sistema.

Estos cambios indican que el hidrogel no corresponde únicamente a una mezcla física de polímeros, sino a una red polimérica donde existen interacciones entre MD, CS y Alg, probablemente mediante puentes de hidrogeno y asociaciones intermoleculares [14].

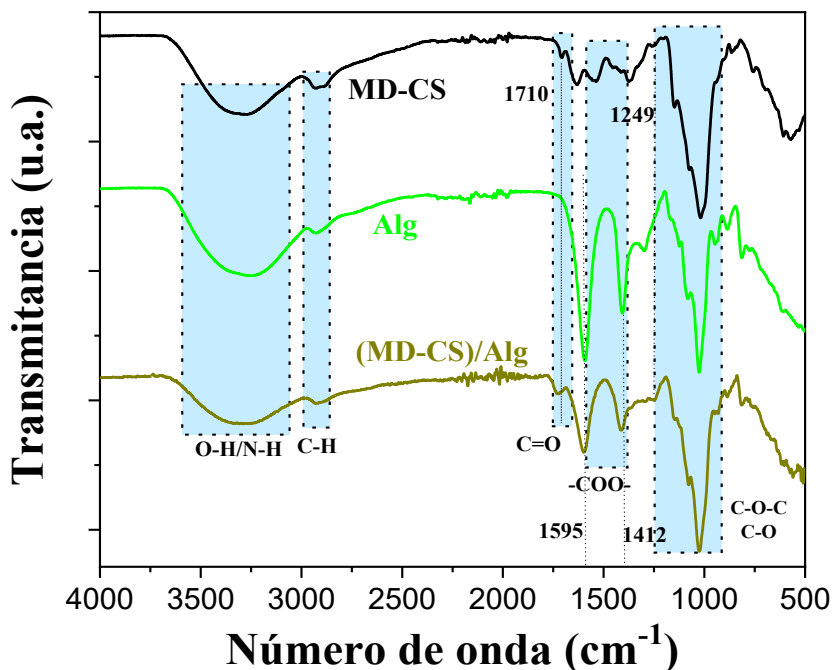


Figura 20. Espectros de FTIR de MD-CS, Alg y el hidrogel ternario (MD-CS) /Alg

7.2.2. Análisis de TGA del hidrogel (MD-CS) /Alg

En el análisis de TGA (Figura 21), la curva de TGA del Alg mostró una pérdida mayoritaria de peso en un rango de temperatura de 200-250 °C correspondiente a la degradación de la cadena principal (unidades de ácido manurónico y gulurónico). Por su parte, la MD-CS mostró una pérdida de peso asociada al agua físicamente absorbida (50-100 °C) y una pérdida principal en un rango de 200-450 °C asociada a la descomposición de las cadenas principales de MD y CS.

Individualmente, el hidrogel ternario presentó también una pérdida de masa asociada a la eliminación de agua presente en la estructura del material, así como una degradación principal en un intervalo similar a la observada para MD-CS. Esto sugiere la existencia de interacciones entre MD, CS y Alg generando una estructura con mayor estabilidad y distribución más homogénea de los procesos de degradación. Además, el perfil térmico obtenido indica que el hidrogel ternario no se comporta como una simple mezcla física de sus componentes, sino como un sistema con propiedades propias derivadas de la interacción entre los tres polímeros [45].

A su vez, las curvas de DTG de estos materiales son mostradas en la Figura 22. La curva de DTG para el Alg mostró un pico máximo de degradación en 210 °C mientras que la muestra de MD-CS exhibió dos picos en 220 y 350 °C debidos a la descomposición de MD y CS, respectivamente.

Por su parte, la curva de DTG del hidrogel ternario mostró picos asociadas a degradaciones principales en 210 °C debido a la presencia de Alg y 230 °C debido a la descomposición de la cadena principal del MD-CS, respectivamente [43,46].

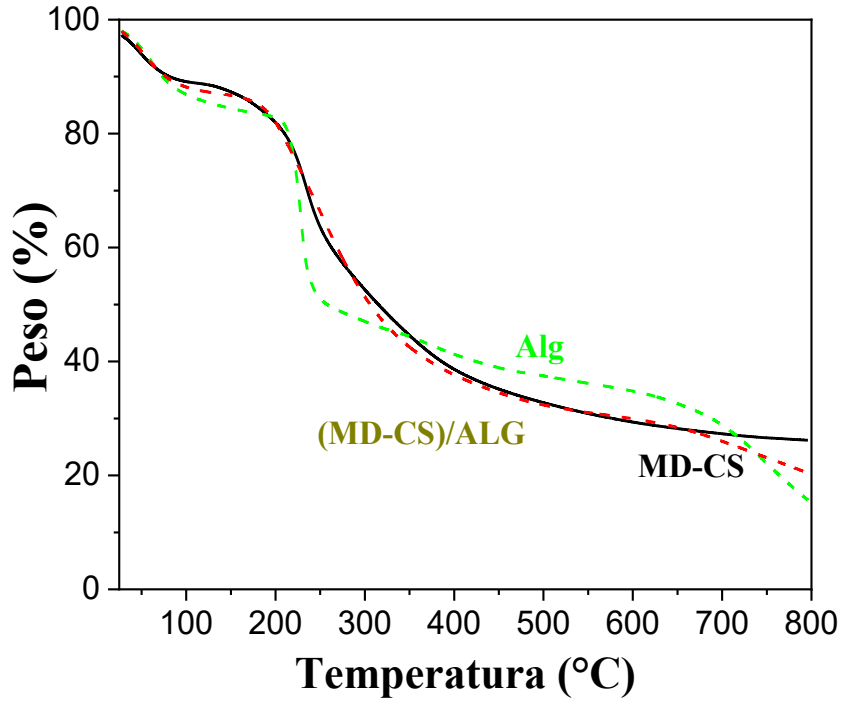


Figura 21. Curvas de TGA del hidrogel (MD-CS) /Alg, MD-CS y Alg

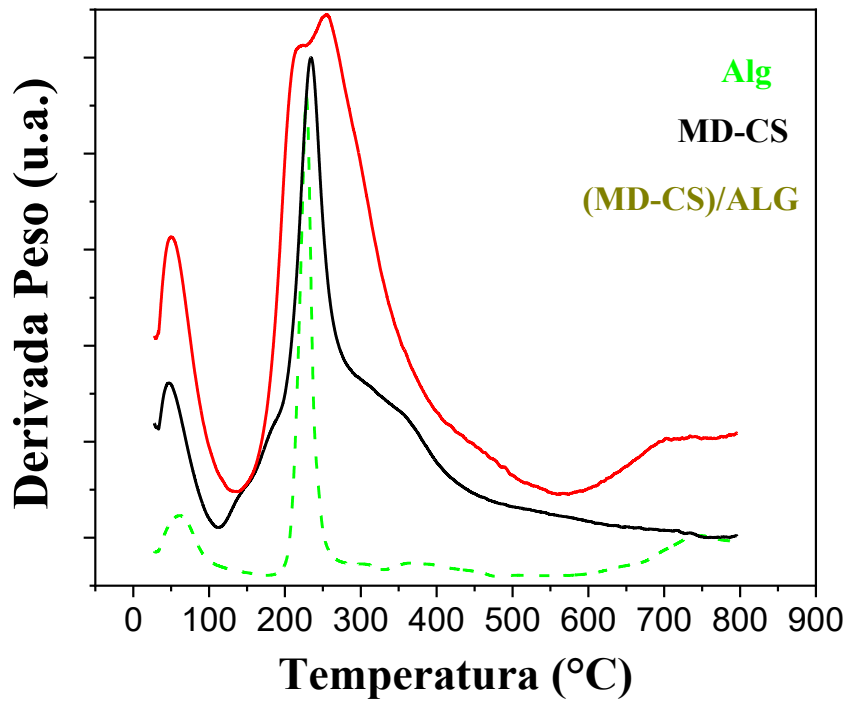


Figura 22. Curvas de DTG relacionadas al Alg, MD-CS y el hidrogel (MD-CS) /Alg

7.2.3. Pruebas de hinchamiento del hidrogel CS/AlgOx

En el caso del hidrogel ternario (MD-CS) /Alg, los resultados mostraron un comportamiento diferente al observado en el sistema binario. Inicialmente, el hidrogel presentó una elevada absorción de agua, alcanzando porcentajes de hinchamiento superiores al 1200 %, lo que evidencia una importante afinidad por el medio acuoso. Sin embargo, conforme avanzó el tiempo del ensayo, se observó una disminución gradual en el porcentaje de hinchamiento, hasta alcanzar valores considerablemente menores al final del análisis. (Figura 23)

Este comportamiento puede estar asociado a la incorporación de MD en la red polimérica. La MD es un polisacárido altamente hidrofílico que favorece la rápida absorción de agua debido a la abundancia de grupos hidroxilo en su estructura química. No obstante, su incorporación también puede generar una disminución en la compactación de la red tridimensional, ocasionando una estructura menos rígida y con menor estabilidad frente a periodos prolongados de hidratación.

La disminución progresiva del hinchamiento podría indicar una relajación de las cadenas poliméricas o incluso una pérdida parcial de integridad estructural del hidrogel durante el ensayo. Esto sugiere que, aunque el hidrogel ternario posee una elevada capacidad inicial de absorción, la retención de agua no se mantiene de forma constante con el tiempo. Dicho comportamiento puede relacionarse con una menor densidad de reticulación o con la presencia de regiones más amorfas dentro de la matriz polimérica, facilitando la salida de agua retenida conforme la estructura se reorganiza.

Por otra parte, la interacción entre MD, CS y Alg pudo haber modificado el balance entre flexibilidad y estabilidad de la red polimérica. La presencia de cadenas más flexibles favorece la entrada de agua al sistema; sin embargo, también puede incrementar la susceptibilidad del hidrogel a procesos de expansión excesiva, relajación estructural o degradación parcial en medios acuosos.

A pesar de la disminución observada durante el ensayo, el hidrogel (MD/CS) /Alg presentó una capacidad de absorción considerable, lo cual continúa siendo una característica relevante para aplicaciones agrícolas. La rápida captación de agua podría favorecer procesos de hidratación inicial en semillas o suelos con baja disponibilidad hídrica. Sin embargo, los resultados sugieren

que este sistema requiere una mayor estabilidad estructural para mejorar la retención prolongada de agua y optimizar su desempeño en aplicaciones donde se demanden periodos extendidos de liberación hídrica.

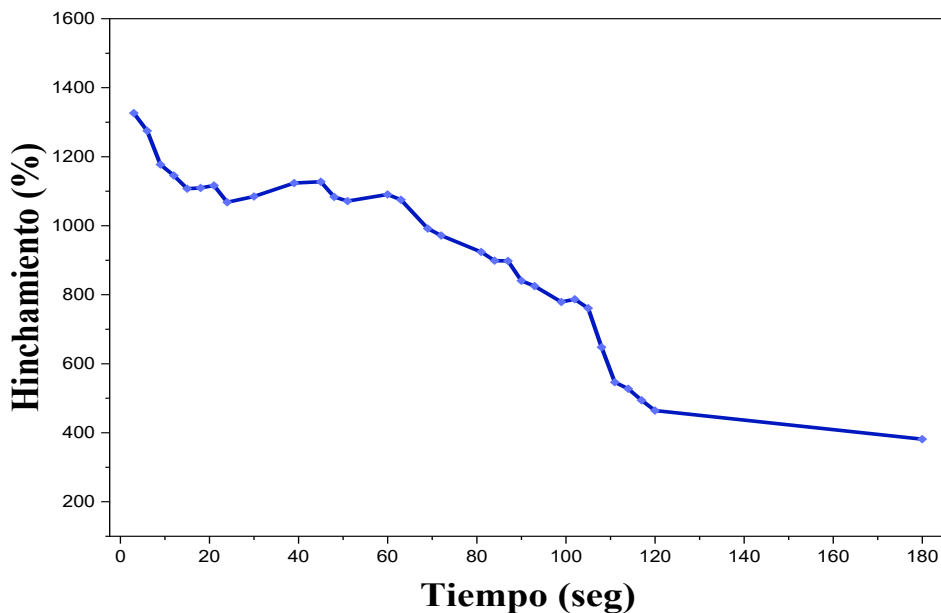


Figura 23. Pruebas de hinchamiento del hidrogel (MD-CS) /Alg

7.3. Evaluación del efecto de los hidrogeles sobre el porcentaje de germinación y crecimiento vegetal

7.3.1. Evaluación del hidrogel de CS/AlgOx

Se evaluó el efecto del hidrogel CS/AlgOx sobre la germinación y el crecimiento inicial de plántulas de maíz a diferentes concentraciones (50, 100, 150, 200 y 300 ppm). En la Tabla 3 se presentan los resultados obtenidos para las variables analizadas.

Los resultados mostraron un alto porcentaje de germinación en todos los tratamientos llegando hasta un 95 %, lo que evidencia que este hidrogel no mostró efectos inhibitorios severos. Esto indica que el hidrogel es compatible con el proceso de germinación, aunque podría generar condiciones menos estables en comparación con otros sistemas, que más adelante se discutirán.

El registro fotográfico de las plántulas tratadas con diferentes concentraciones del hidrogel binario a los 4 y 7 días de germinación se presenta en el Anexo (Figura A2 y A3).

En cuanto al crecimiento de la plúmula, se observó que las muestras tratadas con el hidrogel mostraron un mayor crecimiento que el control. Además, este crecimiento se vio influenciado por la concentración usada del hidrogel, el cual se incrementó conforme su aumento dicho parámetro, alcanzando el valor máximo a una concentración de 200 ppm (15.83 cm). Este comportamiento sugiere que a concentraciones elevadas del hidrogel se estimula el desarrollo de la parte aérea de la plántula, posiblemente debido a una mayor disponibilidad de agua en etapas posteriores a la germinación.

Respecto a la longitud de la raíz, de igual manera se encontró que el hidrogel presentó un mayor crecimiento con respecto al control con un incremento a partir de una concentración de 100 ppm. Esto indica que el hidrogel permite un desarrollo radicular adecuado, sin una variación significativa en el rango de concentración estudiado.

Tabla 3. Valores de porcentaje de germinación, plúmula, raíz y porcentaje de agua de las semillas tratadas con el hidrogel binario CS/AlgOx a diferente concentración.

Tratamiento		Germinación (%)	Plúmula (cm)	Raíz (cm)	Peso fresco (g)	Peso seco (g)	Agua (%)
T1	agua	92	10.94 (±0.89)	23.95 (±0.73)	19.70 (±1.35)	6.10 (±0.32)	68.92 (±2.74)
T2	50 ppm	91	10.36 (±1.44)	23.69 (±3.21)	19.55 (±2.22)	5.85 (±0.54)	69.99 (±1.57)
T3	100 ppm	95	12.96 (±0.55)	28.38 (±0.31)	22.60 (±2.49)	5.85 (±0.40)	74.02 (±1.27)
T4	150 ppm	86	13.12 (±0.43)	28.20 (±1.37)	21.20 (±2.52)	6.075 (±0.150)	71.05 (±3.31)
T5	200 ppm	90	15.83 (±0.84)	28.52 (±1.51)	23.85 (±2.22)	5.875 (±0.386)	75.31 (±1.05)

T6	300 ppm	91	14.91 (±0.65)	29.48 (±1.45)	24.825 (±1.014)	5.85 (±0.17)	76.40 (±1.46)
----	---------	----	------------------	------------------	--------------------	-----------------	------------------

Por otro lado, los valores del porcentaje de agua mostraron un ligero incremento al aumentar la concentración. Este comportamiento indica que el hidrogel posee la capacidad para retener y mantener el agua disponible, lo que refleja una adecuada absorción por parte de las plántulas.

Durante el desarrollo del experimento, se observó que la muestra control no mantenía la humedad de forma constante en comparación con las muestras tratadas con el hidrogel, sugiriendo que este material retuvo de una manera más eficiente la humedad.

Asimismo, se identificó que el crecimiento de la plúmula y raíz en ciertas muestras no siempre fue directamente proporcional, observándose en algunos casos, que una menor elongación aérea (plúmula) se acompañó de un mayor desarrollo radicular y viceversa, lo cual puede interpretarse como una respuesta adaptativa de la planta frente a condiciones de una disponibilidad heterogénea de agua en el “taco”.

Adicionalmente, se evaluó el crecimiento de plántulas de maíz empleando la mezcla física de estos polisacáridos y los resultados obtenidos son mostrados en la Tabla 4. De esta tabla se puede apreciar que la mezcla física de polisacáridos mostró un ligero incremento en el porcentaje de germinación y longitudes de raíz similares, sin embargo, los valores de plúmula y porcentaje de agua esta mezcla física mostró un menor crecimiento con respecto a los obtenidos para las muestras tratadas con el hidrogel. Esto menor crecimiento pudiera deberse a que las muestras tratadas con la mezcla física CS/Alg requerían de una adición constante de agua durante todo el experimento, pudiendo ocasionar un retraso en su crecimiento.

Tabla 4. Valores de porcentaje de germinación, plúmula, raíz y porcentaje de agua de las semillas tratadas con la mezcla física de CS/Alg a diferente concentración.

	Tratamiento	Germinación (%)	Plúmula (cm)	Raíz (cm)	Peso fresco (g)	Peso seco (g)	Agua (%)
T1	agua	98	13.31 (±2.53)	28.76 (±4.93)	31.00 (±1.35)	7.21 (±0.36)	76.74

T2	50 ppm	96	10.72 (±2.97)	28.18 (±7.39)	28.12 (±1.30)	7.41 (±0.45)	73.64
T3	100 ppm	98	13.22 (±2.34)	27.92 (±4.94)	31.51 (±1.66)	7.62 (±0.35)	75.81
T4	200 ppm	98	12.27 (±1.61)	29.06 (±2.96)	31.10 (±1.87)	8.24 (±0.27)	75.10
T5	300 ppm	98	11.32 (±1.27)	28.09 (±3.17)	26.76 (±2.28)	6.97 (±0.79)	73.95

7.3.2. Evaluación del hidrogel de (MD-CS) /Alg

El hidrogel ternario (MD-CS) /Alg fue evaluado bajo las mismas condiciones experimentales, con el fin de analizar su efecto sobre la germinación y el crecimiento inicial de las plántulas de maíz. En la Tabla 5 se muestran los resultados correspondientes.

Los resultados obtenidos para este sistema mostraron que el porcentaje de germinación se mantuvo elevado a todas las concentraciones evaluadas (98-99%), lo que indica que este hidrogel no presenta efectos fitotóxicos y favorece un adecuado proceso de imbibición de las semillas. El registro fotográfico correspondiente a las pruebas de germinación del hidrogel ternario a diferentes concentraciones y tiempo de incubación presenta en el Anexo (Figura A4 y A5).

En cuanto al crecimiento de la plúmula, se observó una tendencia general al incremento conforme aumentó la concentración, alcanzando su valor máximo en 300 ppm (12.23 cm). No obstante, a una concentración de 100 ppm se presentó una disminución notable (6.63 cm), lo que sugiere que la respuesta del sistema no es completamente lineal, posiblemente debido a variaciones en disponibilidad de humedad. Adicionalmente, al igual que el hidrogel CS/AlgOx, se observaron casos donde una menor elongación de la plúmula estuvo acompañada de un mayor crecimiento radicular, lo que sugiere una redistribución de recursos como mecanismo de adaptación a las condiciones del sistema.

Respecto a los valores de longitud de raíz, no mostraron una variación en función de la concentración del hidrogel, solo se observó un ligero crecimiento de este parámetro a concentraciones altas, alcanzando hasta 30.79 cm a 200 ppm. Este comportamiento sugiere que el sistema favorece el desarrollo radicular, probablemente debido a la capacidad del hidrogel para mantener humedad disponible en la zona de crecimiento durante todo el experimento. Cabe mencionar que en comparación con el hidrogel CS/AlgOx, el hidrogel (MD-CS) /Alg presentó valores ligeramente superiores, lo que podría indicar un comportamiento más estable en la disponibilidad de humedad dentro del proceso de germinación.

Tabla 5. Valores de porcentaje de germinación, plúmula, raíz y porcentaje de agua de las semillas tratadas con el hidrogel ternario (MD-CS) /Alg a diferente concentración.

Tratamiento		Germinación (%)	Plúmula (cm)	Raíz (cm)	Peso fresco (g)	Peso seco (g)	Agua (%)
T1	agua	99	9.79 (±0.85)	28.53 (±0.73)	21.575 (±1.953)	4.90 (±0.14)	77.11 (±2.65)
T2	50 ppm	99	10.83 (±0.48)	28.94 (±3.21)	17.50 (±0.97)	3.875 (±0.450)	77.77 (±3.20)
T3	100 ppm	98	6.63 (±0.73)	28.04 (±0.31)	16.075 (±2.225)	4.775 (±0.310)	69.88 (±4.38)
T4	150 ppm	98	8.77 (±0.56)	28.69 (±1.37)	20.40 (±1.68)	5.00 (±0.34)	75.36 (±2.62)
T5	200 ppm	99	10.79 (±0.91)	30.79 (±1.51)	21.65 (±2.27)	4.675 (±0.171)	78.17 (±3.04)
T6	300 ppm	99	12.23 (±0.15)	30.50 (±1.45)	23.95 (±1.67)	4.775 (±0.096)	80.01 (±0.96)

El porcentaje de agua registrado en este hidrogel fue superior al observado en el hidrogel CS/AlgOx, alcanzando valores cercanos al 80%. Esto evidencia que la incorporación de MD modifica la capacidad de interacción del hidrogel con el agua, favoreciendo una mayor capacidad de retención hídrica.

Es importante mencionar que, durante el desarrollo de estos experimentos, se observó que el hidrogel (MD-CS) /Alg permitió mantener la humedad mayor tiempo con respecto a aquellas muestras tratadas con el hidrogel CS/AlgOx, reduciendo en gran medida la necesidad de adicionar agua. Sin embargo, en condiciones de exceso de humedad, algunas semillas podrían generar condiciones de saturación que limiten la disponibilidad de oxígeno y afectar el desarrollo normal de la raíz.

En comparación con los parámetros obtenidos para la mezcla física MD/CS/Alg (Tabla 6), el hidrogel mostró un mejor desempeño en todos los parámetros evaluados, incluyendo porcentaje de germinación, crecimiento de plúmula, longitud de raíz y contenido de agua. Esto sugiere que la formación de una red polimérica favorece una interacción más eficiente con el agua en comparación con una mezcla física de los componentes, permitiendo una liberación más controlada de humedad y condiciones más estables para el crecimiento de las plántulas.

Tabla 6. Valores de porcentaje de germinación, plúmula, raíz y porcentaje de agua de las semillas tratadas con la mezcla física de MD/CS/Alg a diferente concentración.

Tratamiento		Germinación (%)	Plúmula (cm)	Raíz (cm)	Peso fresco (g)	Peso seco (g)	Agua (%)
T1	agua	98	13.31 (±2.53)	28.76 (±4.93)	31.00 (±1.35)	7.21 (±0.36)	76.74
T2	50 ppm	99	5.30 (±3.09)	28.67 (±6.30)	22.12 (±2.14)	8.07 (±0.25)	63.51
T3	100 ppm	99	7.20 (±2.07)	28.83 (±5.42)	25.47 (±1.88)	8.32 (±0.53)	67.33
T4	200 ppm	96	4.30 (±2.31)	25.11 (±9.20)	21.93 (±1.88)	8.51 (±0.22)	61.19
T5	300 ppm	94	4.07 (±2.23)	24.45 (±6.97)	21.88 (±1.68)	8.53 (±0.57)	61.01

VIII. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se logró la síntesis y caracterización de dos sistemas de hidrogeles basados en polisacáridos naturales: un sistema binario constituido por CS y AlgOx, y un sistema ternario formado por MD-CS y Alg. Ambos materiales fueron desarrollados con el propósito de evaluar su potencial como sistemas capaces de modificar la disponibilidad de agua y su efecto sobre la germinación y crecimiento inicial de plántulas de maíz.

Los resultados de caracterización permitieron confirmar la formación exitosa de ambos hidrogeles. En el caso del hidrogel CS/AlgOx, se comprobó la oxidación adecuada del Alg mediante peryodato, generando grupos funcionales capaces de favorecer la interacción con el CS y la formación de una red polimérica estable. Por su parte, el hidrogel (MD-CS) /Alg presentó evidencia de interacción entre los tres componentes mediante cambios estructurales observados durante la caracterización, indicando la integración adecuada de los polímeros dentro del material final.

Los análisis mediante espectroscopia de FTIR permitieron identificar las bandas características de cada componente y confirmar modificaciones asociadas a la formación de los hidrogeles. Complementariamente, el análisis termogravimétrico (TGA y DTG) evidenció cambios en el comportamiento térmico de los sistemas sintetizados respecto a sus componentes individuales, indicando la generación de estructuras con propiedades propias derivadas de las interacciones dentro de la red polimérica.

Las pruebas de hinchamiento demostraron que los hidrogeles desarrollados poseen capacidad de absorción y retención de agua, característica que resulta relevante para aplicaciones agrícolas orientadas al aprovechamiento eficiente del recurso hídrico.

En particular, el hidrogel ternario mostró una mayor capacidad para mantener condiciones de humedad dentro del sistema de germinación, favoreciendo un mayor contenido de agua en las plántulas, mientras que el hidrogel binario presentó un comportamiento adecuado sin generar efectos inhibitorios importantes sobre el crecimiento inicial de las plántulas. Sin embargo, los resultados también sugieren que una mayor disponibilidad de agua no necesariamente se traduce en un mayor crecimiento vegetal, evidenciando que existe un equilibrio entre hidratación y disponibilidad de oxígeno durante el desarrollo temprano.

Respecto a la evaluación biológica, los tratamientos aplicados no afectaron negativamente el proceso de germinación de las semillas de maíz, manteniéndose porcentajes elevados de germinación en ambos hidrogeles. Asimismo, se observaron diferencias en parámetros de crecimiento como longitud de plúmula, desarrollo radicular y contenido de agua, indicando que la respuesta vegetal estuvo influenciada tanto por la composición del hidrogel como por la concentración aplicada.

En conjunto, los resultados obtenidos permiten concluir que los hidrogeles desarrollados representan una alternativa basada en polímeros naturales con potencial de aplicación agrícola, especialmente como materiales capaces de favorecer la retención de agua y modificar las condiciones de humedad durante la germinación. No obstante, se requiere continuar evaluando su comportamiento bajo otras condiciones de cultivo y escalas experimentales para comprender con mayor profundidad su interacción con sistemas vegetales y su posible implementación en estrategias orientadas al uso eficiente del agua en agricultura.

IX. REFERENCIAS

- [1] Bewley, J. D., Bradford, K. J., Hilhorst, H. W. M., & Nonogaki, H. (2013). **Seeds: Physiology of development, germination and dormancy** (3rd ed.). Springer.
- [2] Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2015). **Plant physiology and development** (6th ed.). Sinauer Associates.
- [3] Nonogaki, H., Bassel, G. W., & Bewley, J. D. (2010). Germination: Still a mystery. **Plant Science*, 179*(6), 574–581. (<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.02.010>)
- [4] Ahmed, E. M. (2015). Hydrogel: Preparation, characterization, and applications. **Journal of Advanced Research*, 6*(2), 105–121. (<https://doi.org/10.1016/j.jare.2013.07.006>)
- [5] Caló, E., & Khutoryanskiy, V. V. (2015). Biomedical applications of hydrogels. **European Polymer Journal*, 65*, 252–267. (<https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.11.024>)
- [6] Guilherme, M. R., et al. (2015). Superabsorbent hydrogels based on polysaccharides. **European Polymer Journal*, 72*, 365–385. (<https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2015.04.017>)
- [7] Thakur, V. K., & Thakur, M. K. (2014). **Processing and characterization of natural polysaccharides**. Springer.
- [8] Rinaudo, M. (2006). Chitin and Chitosan: Properties and applications. **Progress in Polymer Science*, 31*(7), 603–632. (<https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2006.06.001>)
- [9] Ekebafé, L. O., Ogbeifun, D. E., & Okieimen, F. E. (2011). Polymer applications in agriculture. **Biochemistry*, 23*(2), 81–89.
- [10] Dash, M., et al. (2011). Chitosan: A versatile semi-synthetic polymer in biomedical applications. **Progress in Polymer Science*, 36*(8), 981–1014.
- [11] Berger, J., et al. (2004). Structure and interactions in chitosan hydrogels. **European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 57*(1), 19–34.

- [12] Kaczmarek, B., et al. (2020). FTIR analysis of modified polysaccharides. **International Journal of Biological Macromolecules*, 161*, 1148–1158.
- [13] Lee, K. Y., & Mooney, D. J. (2012). Alginate: Properties and biomedical applications. **Progress in Polymer Science*, 37*(1), 106–126.
- [14] BeMiller, J. N. (2019). **Carbohydrate chemistry for food scientists** (3rd ed.). Elsevier.
- [15] Wang, N., et al. (2016). Maltodextrin-based functional materials. **Carbohydrate Polymers*, 151*, 122–131.
- [16] Cárdenas-Valdés, X. (2023). **Desarrollo de hidrogeles basados en maltodextrina y quitosano**. Tesis.
- [17] Narjary, B., et al. (2012). Water availability and crop response using hydrogels.
- [18] Montesano, F., et al. (2015). Biodegradable superabsorbent hydrogel increases water retention. **Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 4*, 451–458.
- [19] Zohuriaan-Mehr, M. J., & Kabiri, K. (2008). Superabsorbent polymer materials. **Iranian Polymer Journal*, 17*(6), 451–477.
- [20] Peppas, N. A., et al. (2000). Hydrogels in pharmaceutical formulations. **European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 50*(1), 27–46.
- [21] Boonthekul, T., Kong, H. J., & Mooney, D. J. (2005). Controlling alginate gel degradation using partial oxidation and bimodal molecular weight distribution. *Biomaterials*, 26(15), 2455-2465. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2004.06.044>
- [22] Pawar, S. N., & Edgar, K. J. (2012). Alginate derivatization. **Biomaterials*, 33*, 3279–3305.
- [23] Grant, G. T., et al. (1973). Biological interactions between polysaccharides and divalent cations.

- [24] Ghobashy, M. M., et al. (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. (<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126467>)
- [25] Ibrahim, M. M., Abd-Eladl, M., & Abou-Baker, N. H. (2015). Lignocellulosic biomass for cellulose-based hydrogel and water optimization in agriculture. *Journal of Applied Polymer Science*, 132*(42), 42652. (<https://doi.org/10.1002/app.42652>)
- [26] Abdel-Aziz, M. S., et al. (2017). Radiation induced crosslinking of polyacrylamide incorporated natural polymers. *Carbohydrate Polymers*, 176*, 318–326. (<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.08.050>)
- [27] Stuart, B. (2004). *Infrared spectroscopy: Fundamentals and applications*. Wiley.
- [28] Coates, J. (2006). Interpretation of infrared spectra. *Encyclopedia of Analytical Chemistry*. (<https://doi.org/10.1002/9780470027318.a5606>)
- [29] Socrates, G. (2001). *Infrared and Raman characteristic group frequencies*. Wiley.
- [30] Hatakeyama, T., & Quinn, F. X. (1999). *Thermal analysis: Fundamentals and applications to polymer science*. Wiley.
- [31] Vyazovkin, S., et al. (2011). ICTAC kinetics committee recommendations for TGA. *Thermochimica Acta*, 520*(1–2), 1–19.
- [32] Eficagua. (n.d.). Hidrogeles agrícolas: ¿qué son? Eficagua. <https://eficagua.cl/hidrogeles-agricolas-que-son/>
- [33] Semillas Hacienda. (n.d.). El ciclo de vida del maíz y su influencia en la presencia de plagas. Semillas Hacienda. <https://semillashacienda.com/sobre-el-maiz/el-ciclo-de-vida-del-maiz-y-su-influencia-en-la-presencia-de-plagas/>

- [35] Macías-Encina, M. A. (2025). Efecto de geles a base de polisacáridos en la germinación y calidad de plántulas de maíz [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro].
- [36] Draget, K. I., Smidsrød, O., & Skjåk-Bræk, G. (2005). Alginates from algae. En *Polysaccharides and Polyamides in the Food Industry* (pp. 1-30). Wiley.
- [37] Yang, J. S., Xie, Y. J., & He, W. (2011). Research progress on chemical modification of alginate. *Carbohydrate Polymers*, 84(1), 33-39.
- [38] Sarmiento, B., Ribeiro, A., Veiga, F., Ferreira, D., & Neufeld, R. (2006). Characterization of insulin-loaded alginate nanoparticles. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 6(9-10), 2833-2841.
- [39] Kumirska, J., Weinhold, M. X., Thöming, J., & Stepnowski, P. (2010). Biomedical activity of chitin/chitosan-based materials. *Polymer*, 51(26), 6138-6152. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2010.09.047>
- [40] Brugnerotto, J., Lizardi, J., Goycoolea, F. M., Argüelles-Monal, W., Desbrières, J., & Rinaudo, M. (2001). An infrared investigation in relation with chitin and chitosan characterization. *Polymer*, 42(8), 3569-3580. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(00\)00713-8](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(00)00713-8)
- [41] Zhang, X., et al. (2015). Schiff-base cross-linked injectable hydrogels based on oxidized alginate and chitosan. *Carbohydrate Polymers*, 121, 185-192. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.12.056>
- [42] Wang, L., Khor, E., Wee, A., & Lim, L. Y. (2002). Chitosan-alginate PEC membrane as a wound dressing. *Biomaterials*, 23(11), 2369-2376. [https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(01\)00325-1](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(01)00325-1)
- [43] Hatakeyama, T., & Hatakeyama, H. (1998). *Thermal properties of green polymers and biocomposites*. Springer.
- [44] Mothé, C. G., & Azevedo, A. D. (2009). Analysis of thermal behavior of chitosan. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 95(3), 825-828.

[45] Kittur, F. S., Harish Prashanth, K. V., Sankar, K. U., & Tharanathan, R. N. (2002). Characterization of chitosan-poly (vinyl alcohol) blends. *Carbohydrate Polymers*, 49(2), 185-193.

[46] George, M., & Abraham, T. E. (2006). Polyionic hydrocolloids for the intestinal delivery of protein drugs: Alginate and chitosan. *Journal of Controlled Release*, 114(1), 1-14.
<https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2006.04.017>

X. ANEXOS

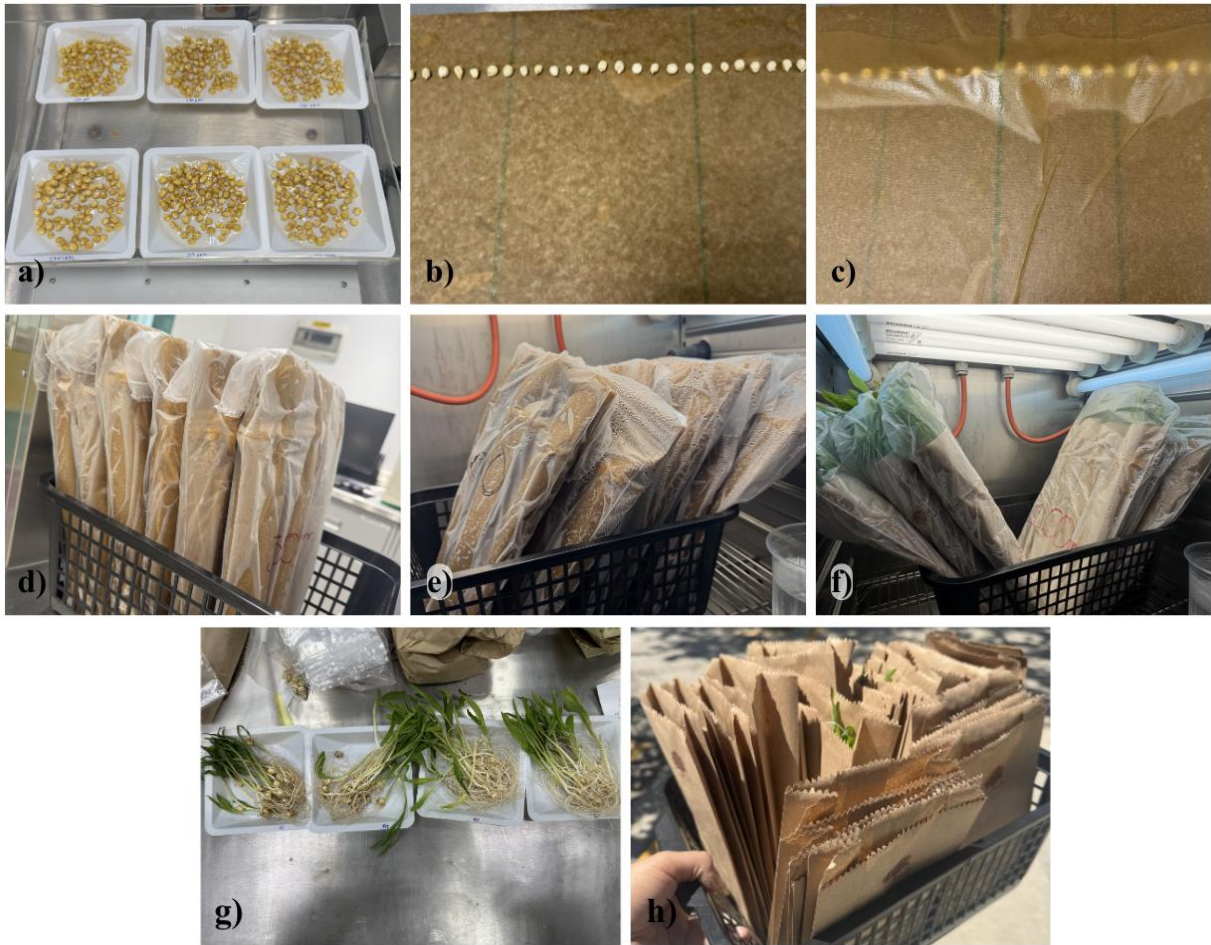


Figura A1. Procedimiento experimental de las pruebas de germinación: a) preparación de semillas; b) colocación de semillas sobre el papel húmedo; c) cobertura de semillas con una segunda hoja de papel; d) formación de los tacos de germinación y colocación en bolsas plásticas; e) introducción de las muestras a incubación; f) crecimiento de las plántulas durante 7 días de incubación; g) separación y pesado de las plántulas de maíz después del periodo de germinación; h) colocación de las muestras en bolsas tipo Kraft para su secado en estufa.

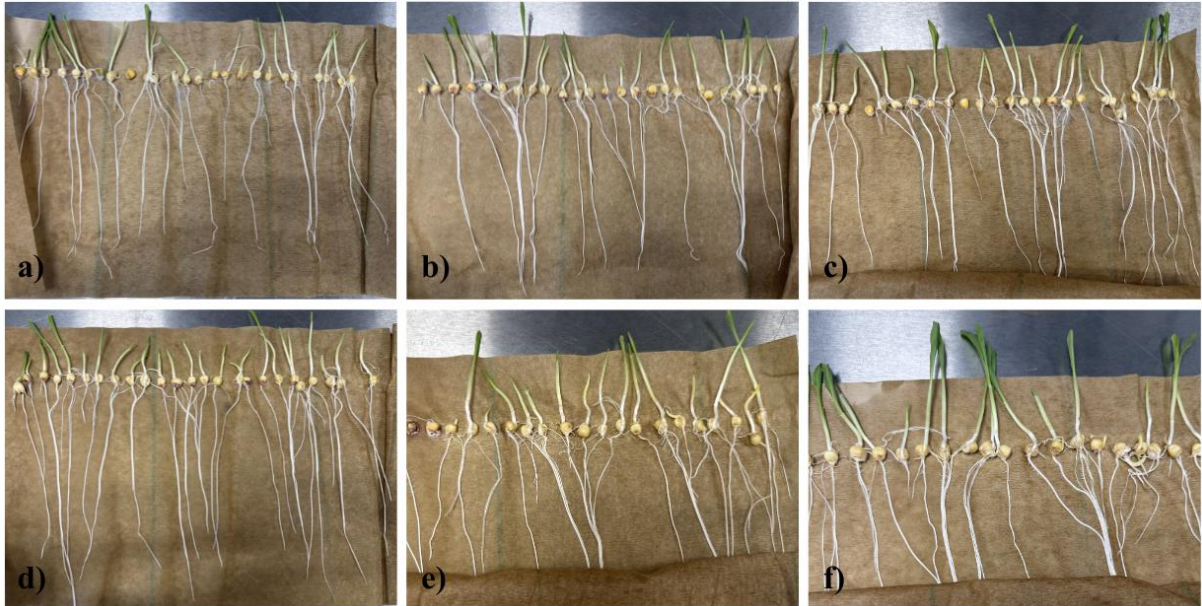


Figura A2. Registro fotográfico de la germinación de semillas de maíz con diferentes concentraciones del hidrogel CS/AlgOx a los 4 días: a) control, b) 50 ppm, c) 100 ppm, d) 150 ppm, e) 200 ppm y f) 300 ppm.

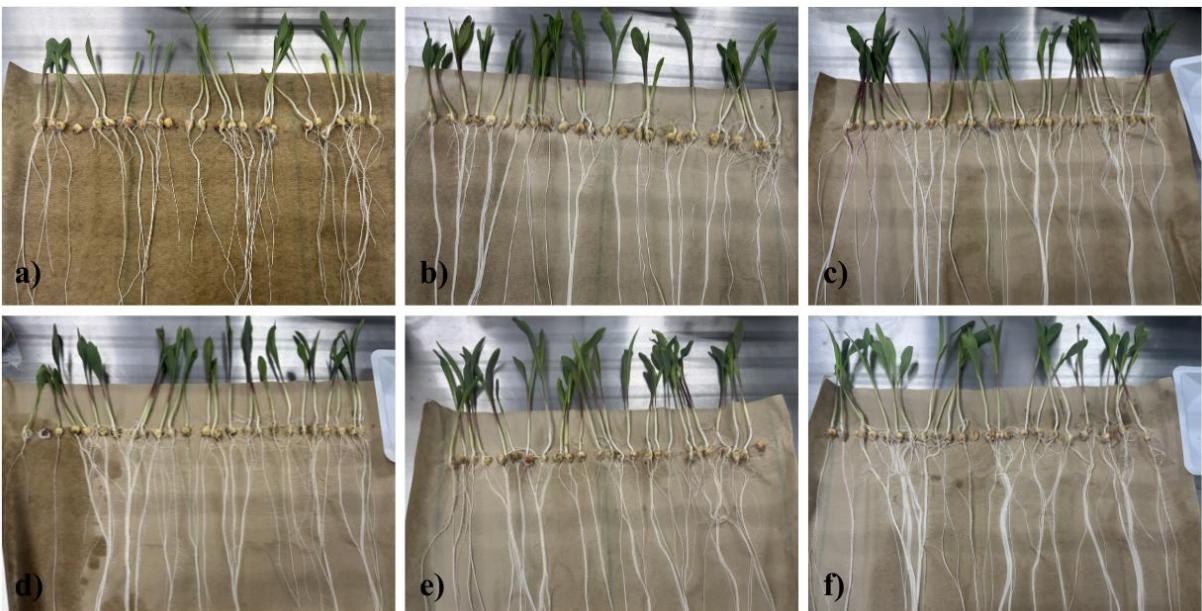


Figura A3. Registro fotográfico de la germinación de semillas de maíz con diferentes concentraciones del hidrogel CS/AlgOx a los 7 días: a) control, b) 50 ppm, c) 100 ppm, d) 150 ppm, e) 200 ppm y f) 300 ppm.

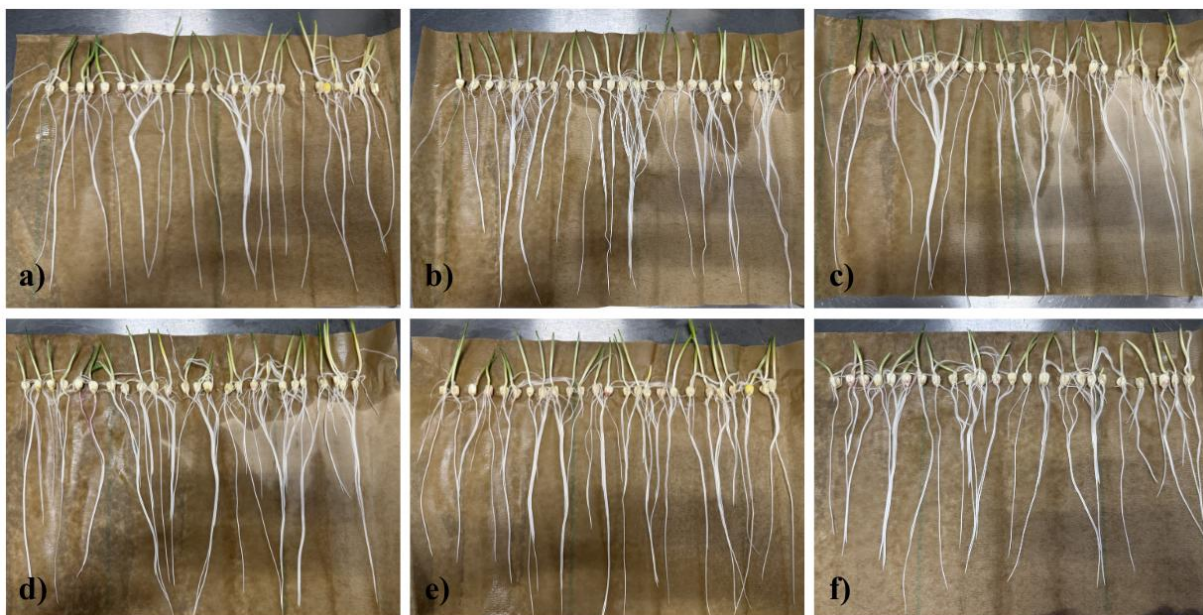


Figura A4. Registro fotográfico de la germinación de semillas de maíz con diferentes concentraciones del hidrogel (MD-CS) /Alg a los 4 días: a) control, b) 50 ppm, c) 100 ppm, d) 150 ppm, e)200 ppm y f)300 ppm.

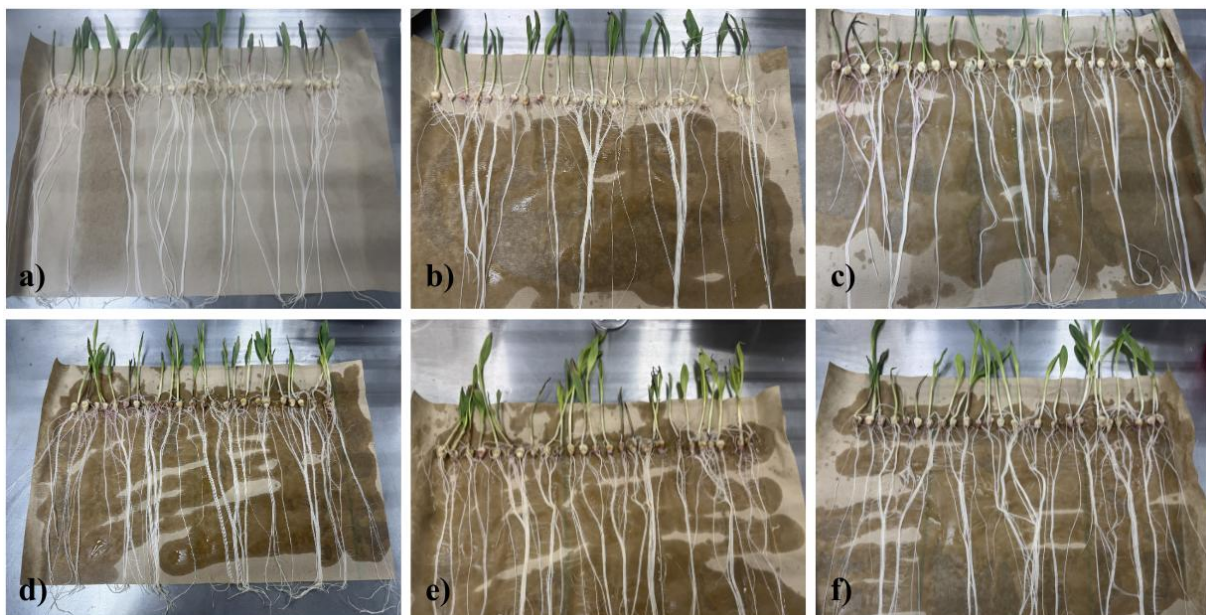


Figura A5. Registro fotográfico de la germinación de semillas de maíz con diferentes concentraciones del hidrogel (MD-CS) /Alg a los 7 días: a) control, b) 50 ppm, c) 100 ppm, d) 150 ppm, e)200 ppm y f)300 ppm.