

## TESIS CON CARACTER ABIERTO

PROGRAMA: MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROPLASTICULTURA

AUTOR: MARÍA DEL CARMEN DAMAS JOB

FIRMA



TITULO: Efecto de polímeros superadsorbentes en la eficiencia de retención de agua y la evaluación en la disponibilidad de Cd, Cu, Zn y K en cultivos de lechuga (*Lactuca Sativa*, L.)

ASESORES: Dr. Claude St Thomas

FIRMA



Dra. Alma Berenice Jasso Salcedo

FIRMA



El Centro de Investigación en Química Aplicada clasifica el presente documento de tesis como ABIERTO.

Un documento clasificado como Abierto se expone en los estantes del Centro de Información para su consulta. Dicho documento no puede ser copiado en ninguna modalidad sin autorización por escrito del Titular del Centro de Información o del Director General del CIQA.

Saltillo, Coahuila, a 22 de Noviembre de 2024



Sello de la Institución

  
Dra. Julieta Torres González  
Directora General del CIQA



**CONAHCYT**  
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES  
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



**CIOA**  
CENTRO DE INVESTIGACIÓN  
EN QUÍMICA APLICADA



**2024**  
*Felipe Carrillo*  
**PUERTO**  
SECRETARIO DE EDUCACIÓN  
PÚBLICA

Saltillo, Coahuila a 26 de noviembre de 2024

**Programa de Maestría en Ciencias en Agroplasticultura**

**Coordinación de Posgrado**

**PRESENTE**

Por este conducto nos permitimos informar a esta coordinación que, el documento de tesis preparado por **MARÍA DEL CARMEN DAMAS JOB** titulado "Efecto de polímeros superadsorbentes en la eficiencia de retención de agua y la evaluación en la disponibilidad de Cd, Cu, Zn y K en cultivos de lechuga (*Lactuca Sativa, L.*)" el cual fue presentado el día 22 de noviembre de 2024, ha sido modificado de acuerdo a las observaciones, comentarios y sugerencias, realizadas por el Comité Evaluador asignado. Por tal motivo, avalamos que el documento corresponde a la versión final del documento de tesis.

Atentamente,

**SINODALES**

Dr. Oussama Mounzer  
Presidente

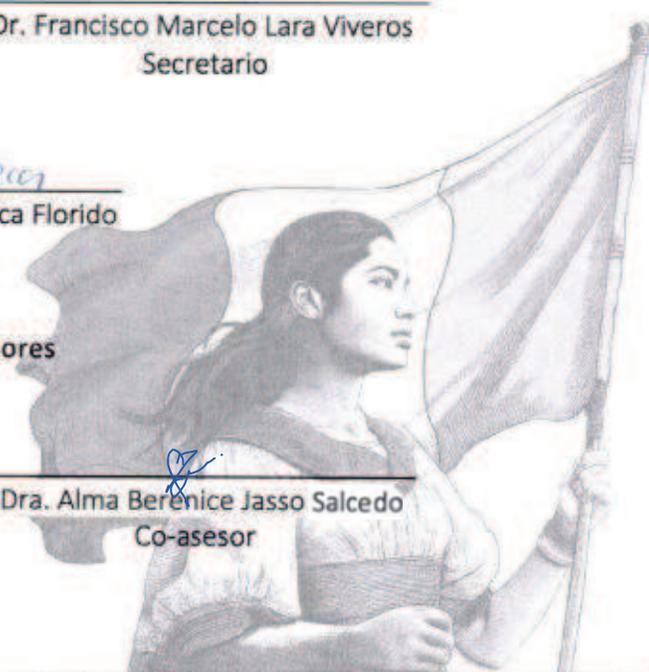
Dr. Francisco Marcelo Lara Viveros  
Secretario

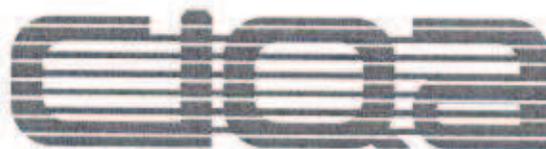
Dra. Heidi Andrea Fonseca Florido  
Vocal

**Vo. Bo. de los Asesores**

Dr. Claude St. Thomas  
Asesor

Dra. Alma Berenice Jasso Salcedo  
Co-asesor





**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA**  
**Programa de Maestría en Ciencias en Agroplasticultura**

*TESIS*

**Efecto de polímeros superadsorbentes en la eficiencia de  
retención de agua y la evaluación en la disponibilidad  
de Cd, Cu, Zn y K en cultivos de lechuga  
(*Lactuca Sativa, L.*)**

*Presentada por:*

**MARÍA DEL CARMEN DAMAS JOB**

*Para obtener el grado de:*

**Maestro en Ciencia en Agroplasticultura**

*Asesorada por:*

**Dr. Claude St. Thomas**  
**Dra. Alma Berenice Jasso Salcedo**

**Saltillo, Coahuila, México.**

**Noviembre, 2024**

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA**  
**Programa de Maestría en Ciencias en Agroplasticultura**

**TESIS**

**Efecto de polimeros superadsorbentes en la eficiencia de retención  
de agua y la evaluación en la disponibilidad de Cd, Cu, Zn y K en  
cultivos de lechuga (*Lactuca Sativa, L.*)**

**Presentada por:**

**MARÍA DEL CARMEN DAMAS JOB**

**Para obtener el grado de:**

**Maestro en Ciencia en Agroplasticultura**

**Asesorada por:**

**Dr. Claude St. Thomas**  
**Dra. Alma Berenice Jasso Salcedo**

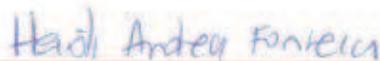
**SINODALES**



**Dr. Qussama Mounzer**  
**Presidente**



**Dr. Francisco Marcelo Lara Viveros**  
**Secretario**



**Dra. Heidi Andrea Fonseca Florido**  
**Vocal**

## DECLARACIÓN

Declaro que la información contenida en la Parte Experimental así como en la Parte de Resultados y Discusiones de este documento y que forman parte de las actividades de investigación y desarrollo realizadas durante el período que se me asignó para llevar a cabo mi trabajo de tesis, será propiedad del Centro de Investigación en Química Aplicada.

Saltillo, Coahuila a 22 de noviembre de 2024



MARÍA DEL CARMEN DAMAS JOB

Nombre y Firma



**GOBIERNO DE  
MÉXICO**



**CONAHCYT**  
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES  
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



**CIQA**  
CENTRO DE INVESTIGACIÓN  
EN QUÍMICA APLICADA

**Programa de Maestría en Ciencias en Agroplasticultura**

Salttillo, Coah, a 08 de noviembre de 2024

**Declaración de documento libre de plagio:**

Mediante esta declaración manifestamos que el documento de tesis titulado **"Efecto de polímeros superadsorbentes en la eficiencia de retención de agua y la evaluación en la disponibilidad de Cd, Cu, Zn y K en cultivos de lechuga (Lactuca Sativa, L.)"** redactado por la **Ing Biotec María del Carmen Damas Job,** y revisado por el (la) **Dr. Claude St Thomas Director y Dra. Alma Berenice Jasso Salcedo /Co-Directora,** está libre de plagio cumpliendo los siguientes aspectos:

<b>Autenticidad y crédito a las fuentes</b>	<b>Revisado*</b>
Los textos son originales	
El documento está libre de oraciones y párrafos copiados de otras fuentes bibliográficas, sitios de internet, etc.	<b>X</b>
El documento está libre de traducciones literales emanadas de literatura en otro idioma	<b>X</b>
Los textos están debidamente referenciados	<b>X</b>
Las citas textuales (si las hay) están entrecomilladas y referenciadas	<b>X</b>
Fotografías, esquemas, gráficas, tablas y otros materiales emanados de otras fuentes están referenciados.	<b>X</b>
Se adjunta reporte de revisión realizado con el software <b>Ithenticate</b> con un registro de <b>18 %</b> de similitud	<b>X</b>

\*Marque con una "X"

Ing. Biotec. Maria del Carmen Damas Job  
Autora

Dr. Claude St Thomas  
Director

Dra. Alma Berenice Jasso Salcedo  
Co-Directora



## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a **Dios** en primer lugar por darme la fortaleza y la guía para completar esta maestría. Ha sido un camino de orgullo y superación personal, donde he invertido tiempo y esfuerzo con determinación. Me siento agradecida conmigo misma por haber perseverado y alcanzado este logro académico. Mi más profundo agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la culminación de este trabajo de tesis. Sus contribuciones y apoyo han sido fundamentales en cada etapa de este camino académico.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por el apoyo financiero otorgado a través de su beca 1238838. Este respaldo fue crucial para llevar a cabo esta investigación de manera efectiva y para concentrarme completamente en el estudio y desarrollo del proyecto. Estoy profundamente agradecida por el financiamiento del proyecto de Ciencia de Frontera No. 1717328 del CONAHCYT y por la oportunidad de contribuir al avance del conocimiento en mi campo de estudio.

Al Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA) por brindarme la oportunidad invaluable de realizar esta investigación. Su compromiso con la excelencia académica y científica ha proporcionado el entorno ideal para el desarrollo de este proyecto.

Agradezco profundamente a Nancy Gpe. Espinosa y Elvia Gpe. González por su invaluable apoyo en la gestión de todos los trámites escolares durante mi maestría. Su dedicación, disposición y profesionalismo fueron fundamentales para facilitar este proceso y alcanzar este importante logro académico.

A mis distinguidos directores de tesis **Dra. Alma Berenice Jasso Salcedo** y al **Dr. Claude St. Thomas**. Les agradezco de todo corazón por su guía experta, su paciencia infinita y su compromiso incansable. Su conocimiento, dedicación y visión fueron cruciales para orientarme y motivarme a alcanzar mis metas académicas. **Gracias infinitas por brindarme su confianza y por ser fuentes inagotables de inspiración.**

**Mi sincero agradecimiento** a mis sinodales, **Dra. Heidi Andrea Fonseca Florido**, **Dr. Oussama Mounzer** y **Dr. Francisco Marcelo Lara Viveros** por su tiempo, dedicación y valiosos comentarios durante la evaluación de este trabajo académico.

A todos los investigadores, técnicos y personal administrativo del CIQA, cuya colaboración y apoyo fueron indispensables para el éxito de este proyecto. Su compromiso con la investigación de calidad

y su disposición para compartir conocimientos y recursos fueron invaluableles.

Al Dr. Eduardo Alfonso Treviño por compartir sus profundos conocimientos y experiencia práctica y científica en el cuidado y desarrollo de plantas en cultivos hidropónicos. Su guía experta ha sido invaluable para mi formación académica y profesional.

Al Dr. Roberto Espinosa Neira por su invaluable colaboración, sus consejos expertos, su amistad y los conocimientos compartidos durante este tiempo. Su apoyo ha sido fundamental para mi crecimiento académico y personal.

Al Dr. Enrique Jiménez por su invaluable apoyo, su generosa amistad y el compartir de sus conocimientos a lo largo de la fase experimental de este proyecto.

Al M. en C. Fernando Ramírez Luna (futuro Doctor en ciencias) por brindarme su conocimiento y experiencia, su paciencia y ser un excelente compañero de trabajo. Su guía y sus consejos fueron fundamentales para superar los retos de esta investigación, y su dedicación fue una fuente constante de inspiración. Aprecio profundamente el tiempo y el esfuerzo que dedicó a orientarme y motivarme en cada etapa del proceso. Gracias por ser no solo un apoyo fundamental, sino también un amigo.

Al apoyo técnico proporcionado por la Dra. Yolanda Ortega, a la M. en C. Gladis Yakeline Cortez Mazatán, al L.C.Q. Jesús Alejandro Espinosa Muñoz, a la M. en C. Hortensia Maldonado, y a la M. en C. Judith Cabello. Su colaboración con las técnicas, manejo de material y equipo ha sido fundamental para el desarrollo de mi investigación.

Al personal de mantenimiento Sr. Pedro García Hdz., en especial al Sr. José de Jesús Gutiérrez Moreno “Don Chuy” por su invaluable apoyo y colaboración en la adaptación de una cámara de crecimiento casera para plantas y adaptación de material para un sistema flotante en cultivo hidropónico, sin olvidar que siempre tenía una sonrisa y saludo amable cada vez que lo encontraba por los pasillos del CIQA.

A mi amiga M. en C. Ariadna Irais González Nuñez por su constante apoyo, su sincera amistad y sus sabios consejos a lo largo de este viaje académico, a pesar de la diferencia generacional que nos separa. Agradezco de corazón todos los momentos, vivencias, aventuras y complicidad compartida. Por la confianza que ha depositado en mí. ¡Gracias por ser parte invaluable de mi vida!

A mis compañeros y amigos MC. Ismael Mateos y el MC. Juan Manuel Moreno por su amistad,

compañía, sus bromas que alegraron muchas veces mis días y por hacer tan amena mi estancia durante toda la maestría. En especial, agradezco a **Juan Manuel** sinceramente su ayuda en cada detalle práctico que hizo posible mi trabajo: desde cargar los garrafones de agua, trasladar material entre laboratorios y colaborar en los procesos. Cada gesto fue fundamental para avanzar en esta etapa, y valoro profundamente su disposición y presencia en cada momento.

A mi madre **Ma. del Carmen Job Hernandez** por su amor incondicional y constante apoyo. Por ser mi fuerza y mi guía, y sobre todo por ser mi inspiración y mi roca. Te amo.

Especialmente a **Carlos Martínez Luría**, por ser un apoyo incondicional durante estos dos años de maestría. La distancia y los desafíos no fueron fáciles, pero tu comprensión y paciencia fueron una fuente constante de aliento en los momentos difíciles. Valoro profundamente el sacrificio que hiciste al acompañarme a la distancia para que pudiera perseguir mis metas académicas. Tus palabras de ánimo y tu confianza en mí fueron una fuerza invaluable para seguir adelante, incluso en los días y en los momentos más desafiantes. Aunque nuestras vidas han tomado caminos distintos, **gracias infinitas** por ser ese apoyo en este viaje tan significativo; tu presencia fue una bendición que recordaré **siempre con gratitud**.

A mis amados hijos, **Diana Paola, Ricardo Alejandro y Carlos E. Mitchel** quienes con amor y paciencia comprendieron mi ausencia durante estos dos años. Gracias por su fortaleza, por entender que cada momento lejos de ustedes fue por un sueño que también es para ustedes. Han sido mi mayor inspiración y mi razón para seguir adelante. Su amor me dio la fuerza para superar cada desafío. **Todo lo logrado es para ustedes, con todo mi amor de mamá.**

A mi dulce **Amy Natalie** (Cielo, como suelo llamarle) mi nieta, quien con su inocencia y alegría iluminó mis días aun en la distancia. Gracias por recordarme la belleza de la vida y por ser mi fuente constante de ternura. Cada logro que celebro es también para ti, para que sepas que en cada paso siempre estuviste presente en mi corazón. **Que mi esfuerzo te inspire a perseguir siempre tus sueños.**

A mi querida nuera Ivonne y mi querido yerno Alberto, gracias por su apoyo y amor en mi ausencia. Su fortaleza y generosidad han sido un pilar para nuestra familia. Agradezco de corazón tenerlos en nuestras vidas.

## DEDICATORIA

A mi madre Ma. del Carmen Job Hernandez

A Carlos Martínez Luría

A mis hijos Ricardo Alexandro, Diana Paola y Carlos Earl Mitchel Martínez Damas.

A mi nieta Amy Natalie Martínez Chávez

A mi nuera Ivonne M. Chávez Hernández

A mi yerno Antonio Alberto Juárez Morales

*Hay quienes alcanzan sus sueños en el ocaso de sus vidas.*

*MC. Damas.*

*Que paso en Parras, que todo cambio...*

*C. St. Thomas.*

## RESUMEN

Una de las problemáticas a nivel mundial es la escasez y contaminación de agua por metales pesados. En este sentido, una alternativa para favorecer la retención de agua en regiones de recurso hídrico limitado, como en el norte del país, consiste en usar los polímeros superadsorbentes basados en poliacrilamida. Por otro lado, el control de la estructura química de los polímeros derivados de acrilamida permite la inclusión de grupos iónicos que funcionan como agentes adsorbentes de metales pesados presentes en agua contaminada provocando un importante impacto en la disponibilidad de estos metales para plantas crecidas en sistemas hidropónicos. Basado en la versatilidad de estos materiales poliméricos para modificarse y su aplicación en diferentes cultivos agrícolas, en esta investigación se planteó preparar distintas poliacrilamidas hidrosolubles lineales como entrecruzadas conteniendo potasio. La síntesis se llevó a cabo a escala de laboratorio obteniendo hidrogeles mediante polimerización radicalica convencional y polimerización por transferencia reversible por adición-fragmentación de cadena (RAFT, por sus siglas en ingles), los cuales tienen la capacidad para adsorber metales pesados y mantener disponible agua, y potasio para el crecimiento de especies demandantes de agua como lechuga (*Lactuca sativa* L.). Se determinaron las propiedades fisicoquímicas de los polímeros mediante técnicas analíticas de espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FT-IR), Resonancia Magnética Nuclear (RMN) y Cromatografía por Exclusión por Tamaño (SEC). Por otra parte, se evaluó la capacidad de los hidrogeles para adsorber metales pesados como cobre (Cu), zinc (Zn) y cadmio (Cd), respectivamente. Como resultado los hidrogeles han demostrado una capacidad de adsorción de >94% de Cu, >98% de Cd y >99% de Zn. La mayor capacidad de hidratación de los hidrogeles fue observada en presencia de agua destilada, con un valor de 2750 veces que su peso seco original. Los hidrogeles CPE3 y CPE4 demostraron ser efectivos en la retención de agua, remoción de metales pesados, lo que los hace adecuados para mejorar los cultivos hidropónicos. Sobresalieron por su capacidad de adsorber metales como cadmio, cobre y zinc, lo que redujo su absorción por las plantas, especialmente en sistemas hidropónicos. CPE4, en particular, mostró una mayor eficiencia en condiciones de alta temperatura y presencia de múltiples metales, logrando una retención superior de agua y estabilidad térmica.

En la investigación, se incorporaron los hidrogeles sintetizados en un sistema hidropónico diseñado para cultivar lechuga (*Lactuca sativa* L.), con el objetivo de evaluar su capacidad para liberar potasio

y adsorber metales pesados en un entorno controlado. Las plantas se desarrollaron en condiciones hidropónicas con solución nutritiva, y el uso de hidrogeles demostró una capacidad notable para regular la disponibilidad de potasio, necesario para el crecimiento y desarrollo vegetal. Al mismo tiempo, los hidrogeles redujeron eficazmente la bioacumulación de metales pesados en los tejidos vegetales, especialmente en las hojas, promoviendo un entorno más seguro para el cultivo. Esta aplicación en el sistema biológico destaca la efectividad de los hidrogeles como herramientas para la agricultura hidropónica sostenible

# CONTENIDO

<b>RESUMEN</b> .....	<b>xi</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>xvi</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>xvii</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>- 1 -</b>
<b>I.1. Polímeros y generalidades</b> .....	<b>- 3 -</b>
I.1.1 Procesos de obtención.....	- 4 -
I.1.2 Tipos de polímeros .....	- 5 -
<b>Naturaleza química y composición del monómero</b> .....	<b>- 5 -</b>
I.1.3 Mecanismo de polimerización .....	- 5 -
<i>Terminación</i> .....	- 6 -
I.1.4 Polímeros Hidrosolubles .....	- 7 -
I.1.5 Uso de los Polímeros Hidrosolubles.....	- 7 -
I.1.6 Polímeros adsorbentes.....	- 8 -
I.1.7 Hidrogeles a base de acrilamida .....	- 8 -
I.1.8 Uso de hidrogeles en la mejora de la calidad del agua .....	- 10 -
I.1.9 Evaluación de hidrogeles para la eficiencia del uso del agua en la agricultura .....	- 11 -
I.1.10 Hidrogeles en la absorción y liberación de sustancias esenciales.....	- 12 -
I.1.11 Liberación controlada de nutrientes a las plantas: Uso de hidrogeles .....	- 13 -
I.1.11.1 Liberación de Potasio por Hidrogeles.....	- 13 -
I.1.11.2 Importancia de la liberación controlada de potasio.....	- 13 -
<b>I.2 Innovaciones en la Agricultura</b> .....	<b>- 14 -</b>
I.2.1 Hidrogeles para la gestión de nutrientes y mitigación de metales pesados .....	- 14 -
I.2.2 Límite permisible de metales en agua para uso y consumo humano y aguas residuales .....	- 16 -
I.2.3 Uso de hidrogeles para la adsorción de metales pesados en sistemas agrícolas .....	- 18 -
I.2.4 <i>Lactuca sativa</i> L. como modelo vegetal para estudio de metales. ....	- 18 -
I.2.5 Uso de hidrogeles en modelos vegetales crecidos en hidroponía.....	- 19 -
I.2.6 Potenciando la agricultura hidropónica: El uso estratégico de hidrogeles. ....	- 20 -
I.2.8 Relevancia del diseño de hidrogeles multifuncionales en la presente investigación: adsorción de metales, liberación de nutrientes y retención de agua. ....	- 21 -
<b>II. HIPÓTESIS</b> .....	<b>- 22 -</b>
<b>III. OBJETIVOS</b> .....	<b>- 22 -</b>
<b>III.1 Objetivo general</b> .....	<b>- 22 -</b>
III.1.1 Objetivos particulares.....	- 23 -
<b>IV MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>- 23 -</b>
<b>IV.1 Lugar de Experimentación</b> .....	<b>- 23 -</b>

IV.2 Reactivos.....	- 23 -
IV.3 Material biológico.....	- 25 -
IV.4 Equipos y Caracterización.....	- 25 -
IV.4.1 Resonancia Magnética Nuclear (RMN).....	- 25 -
IV.4.2 Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FT-IR).....	- 25 -
IV.4.3 Cromatografía por Exclusión de Tamaño (SEC).....	- 25 -
IV.4.4 Análisis elemental mediante ICP-OES.....	- 26 -
IV.5 Procesos de síntesis.....	- 26 -
IV.5.1 Síntesis de homopolímero PAM <i>vía</i> RAFT.....	- 26 -
IV.5.2 Síntesis de copolímeros en bloque PAM- <i>b</i> -PAMPS <i>vía</i> RAFT.....	- 28 -
IV.5.3 Síntesis de copolímero aleatorio PAM- <i>r</i> -PAMPS <i>vía</i> RAFT.....	- 29 -
IV.5.4 Síntesis de copolímero aleatorio PAM- <i>r</i> -PAMPS <i>vía</i> polimerización radicalica convencional-	30
IV.5.5 Síntesis de copolímero aleatorio ramificado (hidrogeles).....	- 31 -
IV.6 Propiedades de los Hidrogeles.....	- 32 -
IV.6.1 Índice de hidratación de hidrogeles de PAM- <i>r</i> -PAMPS-K.....	- 32 -
IV.6.2 Porcentaje de pérdida de agua por evaporación en hidrogeles de PAM- <i>r</i> -PAMPS-K.....	- 33 -
IV.6.3 Retención de agua en copolímeros CPE1, CPE2, CPE3 y CPE4.....	- 34 -
IV.6.4 Adsorción de metales pesados en hidrogeles.....	- 34 -
IV.7 Aplicación de hidrogeles en sistemas biológicos.....	- 36 -
IV.7.1 Desarrollo de bioensayos en hidroponía.....	- 36 -
IV.7.2 Diseño Descriptivo: Evaluación del impacto de diferentes concentraciones de entrecruzante en el copolímero PAM- <i>r</i> -PAMPS-K sobre el crecimiento de plantas de lechuga en un sistema hidropónico para la adsorción de metales pesados.....	- 40 -
IV.7.3 Variables evaluadas.....	- 41 -
IV. 7.3.1 Determinación de biomasa en <i>Lactuca sativa</i> L. (Lechuga).....	- 42 -
IV.7.3.2 Concentración de metales pesados en <i>Lactuca sativa</i> L.....	- 42 -
IV.7.5 Determinación de potasio liberado por hidrogeles.....	- 43 -
V. HERRAMIENTAS DE SOFTWARE.....	- 44 -
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	- 44 -
VI.1 Síntesis y caracterización de (co)polímeros.....	- 44 -
VI.1.1 Síntesis de homo y (co)polímeros hidrosolubles <i>vía</i> polimerización RAFT.....	- 45 -
VI.1.2 Síntesis de copolímeros entrecruzados (CPEs).....	- 46 -
Copolímeros Entrecruzados (CPE) con diferente grado de entrecruzamiento ( 15 y 25 wt% del MBA)-	46 -
VI.1.3. Desempeño de los mecanismos de reacción para la síntesis de homopolímeros y copolímeros mediante polimerización RAFT.....	- 47 -
VI.1.4 Cromatografía por exclusión de tamaño (SEC).....	- 49 -

VI.1.5 Espectroscopia Infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR) ATR .....	- 51 -
VI.1.6 Resonancia Magnética nuclear (RMN 1H) .....	- 52 -
VI.1.6.1 Caracterización de macroRAFT y PAM-b-PAMPS-K .....	- 52 -
VI.1.7 Índice de hidratación de hidrogel PAM- <i>r</i> -PAMPS-K .....	- 54 -
VI.1.8 Índice de evaporación de agua en hidrogeles .....	- 55 -
VI.1.9 Pérdida de Agua en CPE1, CPE2, CPE3 Y CPE4.....	- 57 -
VI.1.10 Porcentaje de adsorción de metales pesados .....	- 60 -
<b>VI.2 Desempeño de hidrogeles en sistemas biológicos</b> .....	- 61 -
VI.2.1 Bioensayos en lechuga ( <i>Lactuca sativa</i> ) con metales pesados en hidroponía .....	- 61 -
VI.2.2 Análisis de la Eliminación de Metales Pesados de la Solución Nutritiva en Tratamientos Hidropónicos .....	- 62 -
VI.2.3 Retención de Metales Pesados (Cd, Cu, Zn) en Tejidos Vegetales e Hidrogeles en Sistemas Biológicos Hidropónicos.....	- 66 -
VI.2.4 Determinación de Biomasa y Potasio (K) en <i>Lactuca sativa</i> L.....	- 69 -
VI.2.5 Potasio (K) en <i>Lactuca sativa</i> L. (lechuga): Un macronutriente esencial para el crecimiento y desarrollo.....	- 74 -
<b>VII. CONCLUSIONES</b> .....	- 79 -
<b>XII. REFERENCIAS</b> .....	- 84 -

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Niveles de referencia de metales en agua de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-127-SSA1-2017, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. ....	- 16 -
<b>Tabla 2.</b> Límites Permisibles para Metales y Cianuros. NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.....	- 17 -
<b>Tabla 3.</b> Lista de reactivos, pureza y proveedor.....	- 24 -
<b>Tabla 4.</b> Concentraciones de macronutrientes, pH y conductividad eléctrica (CE) de una solución sin potasio para cultivos hidropónicos de lechuga.....	- 38 -
<b>Tabla 5.</b> Concentraciones de macronutrientes, pH y conductividad eléctrica (CE) de una solución básica para cultivos hidropónicos de lechuga. * Sandoya et al (2021) ** Lara et al (2023) ..	- 38 -
<b>Tabla 6.</b> Desglose de los tratamientos con los CPE3 y CPE4 en plantas de lechuga en sistema hidropónico.....	- 41 -
<b>Tabla 7.</b> Propiedades y composición de homopolímeros y copolímeros de acrilamida y PAMPS-K sintetizados mediante polimerización RAFT y convencional. ....	- 47 -
<b>Tabla 8.</b> Porcentaje de retención de metales pesados en CPE1, CPE2, CPE3 Y CPE4. Solución con 0.5 g de hidrogel a una concentración de 10 mg/L en 100 ml de agua bidestilada. ....	- 60 -
<b>Tabla 9.</b> Concentración de metales pesados (ppm) en la solución nutritiva al inicio y al final del bioensayo y porcentaje de remoción en CPE3 y CPE4 (aplicados individualmente).....	- 64 -
<b>Tabla 10.</b> Concentración de metales pesados (ppm) en la solución nutritiva al inicio y al final del bioensayo y porcentaje de remoción en CPE3 y CPE4 (aplicados simultáneamente). ....	- 66 -

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Estructura de un polímero (macromolécula).....	3 -
<b>Figura 2.</b> Mecanismo general para sintetizar polímeros por etapas.....	6 -
<b>Figura 3.</b> Representación esquemática de la síntesis del homopolímero poliacrilamida (PAM) vía RAFT (Macro RAFT). .....	27 -
<b>Figura 4.</b> Sistema de reacción empleado para la síntesis del homopolímero (macroRAFT).....	28 -
<b>Figura 5.</b> Representación esquemática de la preparación del copolímero en bloque PAM-b-PAMPS-K vía RAFT. ....	28 -
<b>Figura 6.</b> Ruta descriptiva de la síntesis del copolímero aleatorio lineal PAM-r-PAMPS-K vía RAFT.....	30 -
<b>Figura 7.</b> Síntesis de copolímeros aleatorios PAM-r-PAMPS-K mediante la polimerización radicalica convencional. ....	30 -
<b>Figura 8.</b> Ruta descriptiva de la síntesis del copolímero aleatorio ramificado PAM-r-PAMPS-K. -	32 -
-	
<b>Figura 9.</b> Hidrogel de poli(AM-co-AMPS-K): a) hidrogel seco, b) hidrogel hidratado. ....	33 -
<b>Figura 10.</b> CPE en solución acuosa (agua milli-Q) con metal pesado (Cd, Cu o Zn). ....	36 -
<b>Figura 11.</b> Plántulas de lechuga orejona cultivadas en macetas con sustrato de pearmoss y perlita. a) 5 días despues de la siembra b y c) 10 días despues de la siembra. ....	37 -
<b>Figura 12.</b> Trasplante de plántulas de lechuga orejona ( <i>Lactuca sativa</i> L.) a un sistema hidropónico (sistema flotante o de balsa).....	39 -
<b>Figura 13.</b> Mecanismos generales de reacción. a) Homopolímero PAM vía RAFT, b) Copolímero en Bloque PAM-b-PAMPS-K, c) Copolímero Aleatorio PAM-r-PAMPS-K y d) Copolímeros Aleatorios Entrecruzados (CPE). ....	49 -
<b>Figura 14.</b> Cromatografía por exclusión de tamaño (SEC) de PAM-r-PAMPS-K.....	50 -
<b>Figura 15.</b> Espectro de ATR FT-IR de copolímeros: PAM, CPE1, CPE2, CPE3 Y CPE4.....	52 -
<b>Figura 16.</b> Espectro RMN-1H (agua deuterada) de poliacrilamida (PAM). ....	53 -
<b>Figura 17.</b> Índice de hidratación de los diferentes hidrogeles CPE1, CPE2, CPE3 y CPE4.....	55 -
<b>Figura 18.</b> Índice de evaporación de agua en CPE1, CPE2, CPE3 Y CPE4 en solución nutritiva sin potasio.....	56 -
<b>Figura 19.</b> Pérdida de Agua en CPE1, CPE2, CPE3 Y CPE4 a 30, 40 50 y 60 °C en un periodo de 24 h.....	59 -
<b>Figura 20.</b> Cultivo de <i>Lactuca sativa</i> L. en maceta crecidas en sustrato de Peat Moss y perlita. a) plántulas con 15 días de germinación. b) plántulas con 4 semanas de germinación.....	61 -
<b>Figura 21.</b> Comparativo del crecimiento del cultivo de <i>Lactuca sativa</i> L. (lechuga) en sistema hidropónico al inicio y final del tratamiento. a) Lechuga el día de trasplante previo a la aplicación de los tratamientos y b) lechuga (control) con 3 semanas de tratamiento SB15. c y d) Lechuga (Zinc) en tratamiento SB1 y SB5. ....	62 -
<b>Figura 22.</b> Porcentaje de metales pesados en hojas, raíz, solución nutritiva sin potasio e hidrogel. El sistema biológico hidropónico consta de tratamientos con a)cadmio, b)zinc, c)cobre y d)los tres metales simultáneamente. ....	69 -
<b>Figura 23.</b> Producción de Biomasa de <i>Lactuca sativa</i> L. a las 8 semanas de germinación con 4 semanas de tratamiento CPE3. SB15 no contiene hidrogel. ....	72 -
<b>Figura 24.</b> Producción de Biomasa de <i>Lactuca sativa</i> L. a las 8 semanas de germinación con 4 semanas de tratamiento CPE4. SB15 no contiene hidrogel. ....	74 -
<b>Figura 25.</b> Concentración de Potasio (K) en mg/Kg en <i>Lactuca sativa</i> L. (lechuga) por materia seca con CPE3. ....	76 -

**Figura 26.** Concentración de Potasio (K) en mg/Kg en *Lactuca sativa* L. (lechuga) por materia seca con CPE4. .... - 78 -

## I. INTRODUCCIÓN

Los problemas ambientales derivados de la contaminación de los recursos hídricos naturales están causando grandes preocupaciones a nivel mundial. La principal causa del deterioro de la calidad del agua superficial es la presencia en grandes cantidades de las impurezas de metales pesados y la contaminación causada por estos metales pesados representa un problema grave debido a su toxicidad, acumulación e incapacidad de biodegradarse en el medio ambiente (Rasha *et al.*, 2023). Los residuos de los metales pueden ingresar al medio ambiente de diversas maneras, incluyendo actividades industriales, minería, agricultura, vertidos de residuos, combustión de combustibles fósiles y deposición atmosférica. Una vez en el medio ambiente, estos metales pueden acumularse en el suelo, el agua y en los organismos vivos a lo largo del tiempo lo que puede provocar efectos adversos en la salud humana y los ecosistemas. Los metales pesados son elementos metálicos que tienen una densidad relativamente alta y son considerados como tóxicos en concentraciones elevadas para los organismos vivos, incluyendo humanos, animales y plantas. Algunos ejemplos comunes de metales pesados presentes en los ecosistemas incluyen el plomo (Pb), el mercurio (Hg), el cadmio (Cd), el arsénico (As), el cobre (Cu), el cromo (Cr), el zinc (Zn), entre otros. La exposición a metales pesados puede causar una amplia gama de efectos adversos para la salud, que van desde trastornos agudos hasta enfermedades crónicas. Los metales pesados, no solo son absorbidos por los tejidos vegetales y bioacumularse, sino que están siendo una causa en el desequilibrio de los nutrientes en los diferentes niveles tróficos (Priya *et al.*, 2023). Con el fin de dimensionar algunos límites permitidos de metales pesados que potencialmente podrían encontrarse en ambientes agrícolas, citaremos los recomendados en la regulación mexicana. La NOM-147-SEMARNAT-SSA-2004 principalmente describe sobre contenido de metales en sitios remediados intencionados para uso agrícola señalando niveles permitidos de 37 mg/Kg para Cd. En el caso de composta a base de biomateriales (NMX-E-273-NYCE-2019) y a base de biosólidos para uso agrícola (NOM-004-SEMARNAT-2002), los límites para los metales Cd, Cu y Zn son 39, 1500 y 2800 mg/L, respectivamente. Cabe señalar que los límites citados son generalmente mayores a los de otros del mundo por lo que muchos actores sociales sugieren una actualización de estas normas.

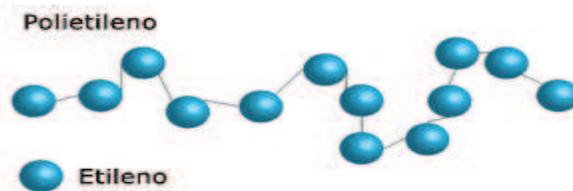
Por otro lado, los polímeros obtenidos a partir de monómeros de acrilamida han ganado interés

dentro de la comunidad científica debido a su aplicación en diversas áreas como la salud, agricultura. Por mencionar su importancia en la agricultura, los polímeros derivados de la acrilamida (PAM) son ampliamente usados como floculantes o suspensión de sólidos para facilitar la remoción eficiente de metales polivalentes en el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados. Adicionalmente, los polímeros a base de acrilamidas son utilizados como súper absorbentes debido a su capacidad para promover la captación y retención de agua en suelos rocosos. Se ha reportado el uso de PAMs como un agente eficiente en el control de la erosión provocada por la lluvia ya que la presencia del polímero incrementa la consistencia del suelo uniendo las partículas sólidas sueltas. Entonces, la poliacrilamida aumenta ligeramente la viscosidad del suelo reduciendo la distancia entre las partículas por lo tanto se evita la lixiviación del suelo durante las fuertes lluvias. Investigaciones recientes evidenciaron que la utilización de poliacrilamida ha tenido un buen desempeño en el tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria textil (Seyed *et al*, 2024).

Con respecto a lo anterior, en esta investigación se pretende preparar diversos polímeros hidrosolubles basados en PAM (hidrogeles) y evaluar su capacidad para disminuir la concentración de tres metales pesados (Cu, Zn y Cd) en lechuga (*Lactuca sativa* L.), incrementar la disponibilidad de nutrientes y retención de humedad en sistemas biológicos debido al porcentaje de entrecruzamiento, concentración y distribución de grupos aminos así como sulfonatos de potasio presentes en la estructura química del polímero para su uso en sistema hidropónico. El diseño, la preparación y la evaluación de los polímeros hidrosolubles derivados de acrilamida contemplan satisfacer tres objetivos primordiales: 1) alta capacidad de retención de agua, 2) capacidad para remover metales pesados y 3) habilidad para liberar un macronutriente (potasio) en sistema biológico en presencia de lechuga.

## I.1. Polímeros y generalidades

Los polímeros son grandes moléculas que están constituidas por unidades repetitivas más pequeñas denominadas monómeros, unidos de forma covalente. Los monómeros se unen entre sí para formar una cadena larga y compleja en las que generalmente implica uniones covalentes entre los átomos de carbono que constituyen la cadena polimérica, en algunos casos la repetición es lineal (Figura 1) pero también en otros casos la cadena puede ser ramificada o interconectada en las cuales están formando retículos tridimensionales. Las reacciones en las que se producen los polímeros sintéticos son llamadas reacciones de polimerización. Si comenzamos con solo un tipo de molécula o monómero, hablaremos de homopolímeros provenientes de una reacción conocida como homopolimerización. Cuando comienza con dos o más moléculas (monómeros) diferentes que se repiten en la cadena, los materiales obtenidos se llaman copolímeros que son productos del proceso de copolimerización. Estas macromoléculas o polímeros pueden ser de orígenes naturales o sintéticos. Los polímeros sintéticos pueden ser orgánicos como inorgánicos y difieren de los naturales en su nombre por ser llamados biopolímeros (Serrano y Mendizabal, 2015).



*Figura 1. Estructura de un polímero (macromolécula)*

Estas grandes macromoléculas o polímeros son materiales muy versátiles que se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones. Dentro de los polímeros más conocidos, se pueden mencionar los plásticos (polímeros preparados y utilizados a gran escala), fibras y elastómeros, entre otros. Por lo tanto, los polímeros se encuentran prácticamente en todas partes de la vida cotidiana considerando aquellos que provienen de la naturaleza hasta los productos sintetizados (Jarrin, 2018).

### I.1.1 Procesos de obtención

Los polímeros sintéticos se obtienen a partir de un proceso químico denominado polimerización en la cual se unen varias moléculas (monómeros) más pequeñas para formar una molécula más grande de decenas hasta miles de unidades repetitivas que forman parte de una larga cadena macromolecular. Las reacciones de polimerización son diversas y su mecanismo depende de la estructura química de los monómeros.

En la ciencia de los polímeros, la clasificación del proceso de polimerización fue originalmente reportada por primera vez por Carothers en 1929 denominando la polimerización por condensación o por adición. Por su parte, Flory (1953) consideró los mecanismos de polimerización dentro de la clasificación de los polímeros por lo que se define el proceso de polimerización en dos grupos: polimerización por etapas o por cadenas. La clasificación del proceso de polimerización por condensación o adición se basa en la composición, así como estructura de los polímeros. Por otra parte, la clasificación de la polimerización por etapas o cadenas escalonadas se basa en los mecanismos de los procesos de polimerización (López, 2005).

Una característica común de la polimerización por condensación (o paso a paso) consiste en la preparación de polímeros a partir de monómeros multifuncionales en varias reacciones de condensación para eliminar una molécula pequeña como el agua. Por ejemplo, la preparación de poliamidas está formada a partir de la reacción de moléculas de diaminas y diácidos con eliminación de agua. En este proceso, la polimerización se produce por reacciones entre grupos funcionales normalmente de diferente naturaleza, como el hidroxilo (-OH), cloruro de acilo (-COCl), carboxilo (-COOH), amina (-NH<sub>2</sub>). El grupo funcional formado por la reacción de grupos monoméricos pasan a formar parte del esqueleto del polímero y se repite hasta la obtención del polímero final. Por otro lado, en cualquier etapa del proceso de polimerización, la mezcla de reacción tendrá una distribución de tamaño de cadena continua la cual considera el tamaño del mismo monómero hasta el polímero de alto peso molecular (Odián, s. f.).

En el caso de la polimerización por cadena o adición, sus características más relevantes están relacionadas al proceso de polimerización el cual ocurre al incorporar repetidamente unidades de monómeros a la cadena en crecimiento y contiene un centro activo hasta la etapa de terminación del proceso de polimerización. En este caso, la reacción de polimerización se produce sin pérdida o eliminación de sustancia (o moléculas pequeñas) por lo que las unidades repetitivas que forman el polímero y el monómero tienen la misma proporción química. A lo largo de este proceso de

polimerización, la mezcla de reacción está compuesta por el monómero y polímero de elevado peso molecular (Odián, s. f.).

### **I.1.2 Tipos de polímeros**

En la actualidad, se han estudiado y reportado diversos tipos de polímeros a nivel mundial. Generalmente, los polímeros se clasifican principalmente según su origen, pudiendo ser naturales o sintéticos, y de acuerdo con el mecanismo de obtención, que incluye polímeros por adición, condensación o reordenamiento. Además, los polímeros también se categorizan en función de varios parámetros, como la estructura de la cadena carbonada, la naturaleza y composición química de las unidades repetitivas, las reacciones de polimerización, entre otros factores.

#### ***Estructura***

Basado en la estructura química del monómero, los polímeros son divididos en tres grandes grupos: lineales, ramificados y entrecruzados (reticulados). En el caso de los polímeros lineales, las cadenas son uniformes y se mantienen unidas por interacciones débiles, como los enlaces de van der Waals o los enlaces de hidrógeno. Por su parte, los polímeros ramificados son caracterizados por la presencia o adhesión de cadenas secundarias a las cadenas poliméricas principales. Finalmente, los polímeros entrecruzados son conocidos como redes poliméricas tridimensionales formadas por entrecruzamientos covalentes o físicos de las cadenas.

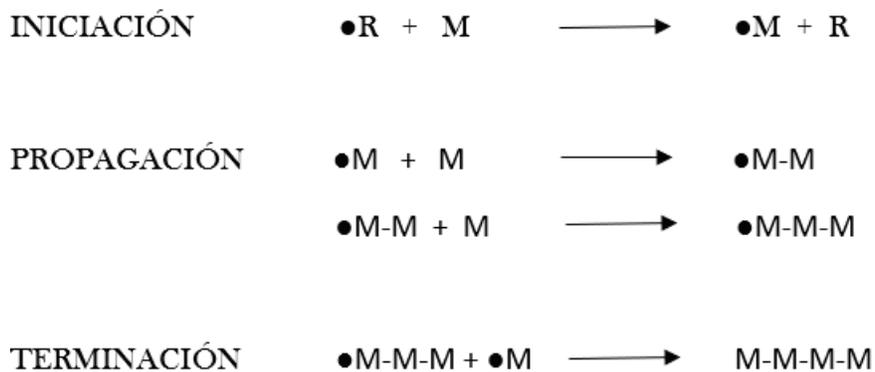
#### **Naturaleza química y composición del monómero**

En esta clasificación, los polímeros pueden ser de origen natural, es decir, son sintetizadas por organismos vivos dentro de las células de animales o vegetales. Por su origen, los polímeros sintéticos se producen químicamente a partir de sustancias simples (monómeros). Los polímeros sintéticos pueden ser obtenidos a partir de compuestos derivados de la naturaleza o moléculas (monómeros) sintetizadas a nivel laboratorio (Hermida, 2011).

### **I.1.3 Mecanismo de polimerización**

Según Jarrín (2018), las reacciones químicas de polimerización se llevan a cabo mediante la

transformación de unidades repetitivas denominadas monómeros, moléculas de bajo peso molecular, con el fin de obtener un polímero, es decir, una macromolécula de alto peso molecular. En el caso de la polimerización por adición, este proceso se lleva a cabo a partir del ataque de los radicales libres provenientes de las moléculas del iniciador al doble enlace del monómero. Este proceso de polimerización se caracteriza por la presencia de tres etapas fundamentales: iniciación, propagación y terminación (ver Figura 2).



*Figura 2. Mecanismo general para sintetizar polímeros por etapas.*

### *Iniciación*

Esta etapa involucra la creación de un sitio activo de radicales libres proveniente del iniciador y usualmente ocurre en dos pasos. El primer paso consiste en la formación de radicales libres a partir del iniciador y segundo paso se relaciona a la adición de estos radicales libres a la molécula del monómero para generar la formación de radicales propagantes (Odian, s. f.).

### *Propagación*

La etapa de propagación se caracteriza por la adición de moléculas de monómero a los radicales propagantes (monómero) sintetizados en la etapa de la iniciación la cual conlleva a un crecimiento de la cadena polimérica mediante la adición de unidades repetitivas (Odian, s. f.).

### *Terminación*

Finalmente, la etapa de terminación consiste en el rompimiento del proceso de crecimiento de la cadena polimérica. Frecuentemente, se reportaron dos mecanismos de terminación del proceso de polimerización: acoplamiento (combinación) y desproporción. La terminación por combinación

implica la unión dos cadenas en crecimiento y la formación de una macromolécula de cadena más larga. Por su parte, la terminación por desproporción se relaciona al rompimiento de un electrón del radical propagante y su unión a una cadena propagante. Este mecanismo conlleva a la formación de dos cadenas poliméricas (Odián, s. f.).

#### **I.1.4 Polímeros Hidrosolubles**

Los polímeros hidrosolubles o hidrofílicos pueden ser definidos como materiales solubles en agua y de gran importancia en diferentes áreas. Una gran cantidad de materiales hidrosolubles en uso actualmente son de origen natural o se derivan de fuentes biológicas mientras que muchos polímeros hidrófilos son diseñados, sintetizados y obtenidos a partir de procesos de polimerización (Hamilton *et al.*, 1997). De acuerdo con Fernández: “un polímero soluble en agua es referido a un material que tiene un número considerable de grupos hidrófilos a lo largo de la cadena principal o de las cadenas laterales. Estos grupos los comprenden principalmente aminas, amidas, carboxilos y sulfónicos. Un grupo muy importante del conjunto de los polímeros hidrosolubles, son los polímeros electrólitos. Estos polímeros tienen unidades repetitivas (monómeros) que pueden perder iones de bajo peso molecular y pasar a ser eléctricamente cargados. Estos iones que se liberan son llamados contraiones. Estos polímeros solubles en agua pueden ser clasificados como aniónicos, catiónicos y zwitteriónicos, conforme al tipo de carga que se produzca sobre la cadena de polímero” (Fernández, 2003).

#### **I.1.5 Uso de los Polímeros Hidrosolubles**

Debido a sus propiedades específicas, los polímeros hidrosolubles han atraído gran interés en el campo de la investigación científica. Por tener la capacidad de solubilizarse en agua, los polímeros hidrosolubles han tenido una amplia variedad de aplicaciones en diferentes campos, incluyendo la industria médica, alimentaria, textil, cosmética, agrícola y tratamiento de aguas, entre otros (Kadajji y Betageri, 2011). En el caso de la agricultura, se ha reportado que la aplicación de los polímeros solubles ha contribuido el crecimiento y la salud de los cultivos, así como la eficiencia del uso del agua la cual conduce a una reducción de los costos de producción (Cisneros, *et al.*, 2020). En el sector agrícola, los polímeros solubles en agua son utilizados como agentes de retención de agua para mejorar la eficiencia del riego. Además, estos materiales pueden asociarse a fertilizantes solubles en agua y facilitar su proceso de liberación progresiva al cultivo. Por otra parte, los polímeros hidrosolubles han tomado importancia en el tratamiento de aguas residuales porque su utilización

como floculantes puede facilitar la eliminación de los contaminantes y mejorar la calidad del agua. En su estudio, Cisneros, *et al* (2020) evaluaron el efecto de la aplicación de polímeros súper absorbentes derivado del acrilato de potasio como acarreador de fertilizante en la siembra del cultivo del maíz (*Zea Mays L*) y se examinaron el desarrollo morfológico, el rendimiento y la eficiencia en el uso del agua para riego en el cultivo. Concluyeron que la aplicación de polímeros ejerció un marcado efecto en el desarrollo morfológico del maíz con un incremento del rendimiento en 14%, un ahorro de agua del 28%, propiciando una productividad agronómica del agua 40% superior al cultivo desarrollado en ausencia del polímero súper absorbente. Finalmente, demostraron que el cultivo desarrollado en presencia de polímeros súper absorbentes tiene una mayor viabilidad en la relación costo-beneficio en comparación con el cultivo sin polímeros

### **I.1.6 Polímeros adsorbentes**

Ramírez *et al.* (2016) señalaron que los polímeros adsorbentes son materiales poliméricos capaces de retener grandes cantidades de agua, lo cual se debe a su estructura tridimensional. Estas macromoléculas son capaces de absorber agua y/u otros líquidos formando un gel hinchado, en el que el líquido se encuentra atrapado en una estructura enmarañada de las cadenas del polímero. Debido a su arquitectura que resulta de varias interacciones intermoleculares y su alta permeabilidad, los polímeros adsorbentes son capaces de cambiar de volumen en respuesta a estímulos externos y su estructura química puede ser diseñada para tener diferentes grados de rigidez y elasticidad. La formación de estos polímeros adsorbentes o hidrogeles se da en un proceso de entrecruzamiento de cadenas de polímeros. Tal proceso se conoce como proceso de "gelificación" y puede ser obtenidos por dos diferentes mecanismos denominados: mecanismo de gelificación por entrecruzamiento físico o por entrecruzamiento químico (Wang, *et al.*, 2020).

### **I.1.7 Hidrogeles a base de acrilamida**

El hidrogel se define como un sistema de dos o múltiples componentes. En la síntesis de hidrogeles a base de acrilamida, los monómeros de acrilamida se polimerizan para obtener polímeros lineales las cuales formaron hidrogeles en presencia de un agente entrecruzante como el N,N'-metilbisacrilamida (molécula que une las cadenas de poli(acrilamida) entre sí para formar una red tridimensional de cadenas de polímeros). Los hidrogeles presentan características fisicoquímicas y propiedades estables como la capacidad de absorber y retener grandes cantidades de agua en su

estructura tridimensional. Los hidrogeles a base de poliacrilamida son generalmente biocompatibles, no son cancerígenos, tóxicos, ni alérgicos, lo que reduce las posibilidades de que se produzca algún efecto secundario. Por lo tanto, estos materiales son seguros para su uso en diferentes áreas (Gangadevi *et al.*, 2020). Los hidrogeles de poliacrilamida (PAM) son materiales versátiles y debido a sus propiedades únicas tienen una amplia gama de aplicaciones en agricultura, ciencias biomédicas, laboratorio y control de la erosión del suelo, entre otros (Liu, *et al.*, 2024). Uno de los usos más significativos de los hidrogeles de poliacrilamida es su capacidad para absorber grandes cantidades de agua. También, existen otras aplicaciones sobresalientes de estos hidrogeles como capacidad para retener iones de metales pesados, como material para andamios en ingeniería de tejidos, como sensores y como súper condensadores. En las últimas décadas, los hidrogeles sintéticos han despertado mucho interés ya que demuestran propiedades superiores en comparación con los hidrogeles derivados de polímeros naturales. Los polímeros (hidrogeles) sintéticos tienen una larga vida útil hasta el fin de su funcionalidad, propiedades mecánicas mejoradas debido a su versatilidad para modificarse ya que la estructura se puede adaptar a su funcionalidad (Gangadevi, *et al.*, 2020).

En el caso del tratamiento de aguas residuales, los hidrogeles a base de poliacrilamida exhibieron buenas capacidades de remoción de metales pesados del agua debido a sus propiedades y capacidad para formar matrices tridimensionales. Para alcanzar una mayor capacidad de remoción de metales, estos polímeros deben ser funcionalizados con grupos quelantes, como los tioles (-SH) o carboxilos (-COOH) los cuales tienen una afinidad específica por ciertos metales pesados. Estos grupos pueden formar enlaces químicos con los iones metálicos en el agua provocando su captura (atrapamiento) dentro de la estructura del gel y posteriormente su remoción del medio acuoso. Adicional a las reacciones químicas, los hidrogeles de poliacrilamida pueden también actuar como adsorbentes para los metales pesados, es decir, pueden atrapar los iones metálicos en su superficie debido a las interacciones físicas (fuerzas de Van der Waals) entre el grupo funcional del polímero y los iones metálicos. La alta área superficial y la porosidad de los hidrogeles pueden mejorar su capacidad de adsorción de metales pesados presentes en el agua. También, estos polímeros pueden ser utilizados en sistemas de filtración para separar los metales pesados del agua. De igual manera, estos materiales pueden ser moldeados en diferentes formas, como membranas o filtros, que permiten el paso del agua mientras retienen los iones metálicos (Ahmaruzzaman, *et al.*, 2023).

### I.1.8 Uso de hidrogeles en la mejora de la calidad del agua

Es fundamental que los recursos hídricos estén libres de diferentes tipos de contaminantes para garantizar la salud humana, el bienestar de los ecosistemas acuáticos y la sostenibilidad ambiental en general. Para alcanzar este nivel, se necesitan urgentemente de tratamientos adecuados y políticas de gestión del agua efectivas, así como prácticas de conservación ambiental. Para abordar estos desafíos de manera integral y sostenible, en particular la eliminación de metales pesados tóxicos de los recursos hídricos contaminados se necesita del desarrollo de nuevas estrategias para lograr dicho objetivo. Cabe mencionar que se han utilizado y reportado diferentes técnicas convencionales como: precipitación química, coagulación/floculación, intercambio iónico, oxidación química, electrodiálisis, fotocatalisis y filtración por membrana para la eliminación de metales pesados tóxicos de los recursos hídricos contaminados. Estas técnicas presentan varios inconvenientes como la reducción de la eficiencia durante el proceso de eliminación de metales pesados, un elevado costo, la generación de cantidades significativas de lodos, una selectividad limitada y uso considerable de productos químicos. En contraste, el uso y la aplicación de hidrogeles puede contribuir significativamente a la restauración y protección del medio ambiente, así como la salud humana en áreas afectadas por la contaminación del agua proporcionando múltiples beneficios en el tratamiento de agua contaminada con metales pesados. Recientemente, Amrita *et al.*, (2023) ha reportado que hidrogeles a base de poliacrilamida pueden desempeñar un papel significativo en la adsorción de Cu 96 % debido a sus propiedades de adsorción, quelación y capacidad de retención, alta porosidad hasta en un 80% en relación con su volumen total, reproducibilidad de los procedimientos de síntesis, estructura flexible, así como estabilidad química. Entonces, es importante destacar que los polímeros especialmente los hidrogeles poseen una capacidad de adsorción selectiva, excelente capacidad de retención de agua, flexibilidad de diseño del material deseado, costo de operación asequible, facilidad de regeneración, compatibilidad con otras técnicas y mínimo impacto ambiental. Por lo que hoy en día, el uso de hidrogeles derivados de poliacrilamidas se ha convertido en una alternativa súper interesante para facilitar la adsorción de metales pesados presentes en aguas contaminadas Ayat Allah (2021). Se ha demostrado que un polímero modificado a base de celulosa, mezclado y entrecruzado con acrilamida y ácido acrílico (Chenxi, *et al.*, 2023) exhibe una notable capacidad de adsorción de iones divalentes ( $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$  y  $\text{Cd}^{2+}$ ) alcanzando valores de 157.51, 393.28 y

289.97 mg/g, respectivamente.

### I.1.9 Evaluación de hidrogeles para la eficiencia del uso del agua en la agricultura

Como se ha mencionado anteriormente, los hidrogeles han sido evaluados con el fin de mejorar el uso eficiente del agua en la agricultura. Los hidrogeles o polímeros súperadsorbentes han sido preparados y caracterizados utilizando diferentes técnicas. F. Yang *et al.*, (2020) reportaron diversas metodologías para evaluar la capacidad de adsorción de agua de los polímeros súperadsorbentes considerando el proceso basado en la cinética de adsorción, análisis espectroscópico como infrarrojo y análisis termogravimétrico (TGA), entre otros. Estas técnicas permiten obtener información detallada sobre las propiedades químicas, físicas y estructurales de los polímeros facilitando el proceso de optimización y diseño del material deseado con el propósito de poder mejorar su capacidad de adsorción de agua. De esta manera y a partir de los resultados, se puede identificar y seleccionar los materiales que tengan la mejor capacidad de retención y absorción agua en el suelo (Amrita, *et al.*, 2021). Estos materiales pueden utilizarse en la agricultura para mejorar el proceso de retención de agua en el suelo reduciendo la frecuencia (necesaria) de riego lo cual aumenta el uso eficiente del agua.

En el área agrícola, los polímeros generalmente utilizados para la retención de agua son aquellos polímeros lineales o hidrogeles sintéticos derivados de PAMs que son capaces de solubilizarse o hincharse en presencia de las moléculas del agua. Investigaciones realizadas por Rozo *et al.*, (2009), demostraron que macromoléculas compuestas de acrilamida y Kappa carragenina (carbohidrato gelificante) fueron usadas para examinar el efecto del copolímero formado de poli(acrilamida) en el crecimiento de *Lactuca sativa*. En este caso, los polímeros fueron aplicados en forma de gel absorbente obtenido previamente a partir de la copolimerización de acrilamida con fibras naturales de Kappa Carragenina. Los resultados demostraron que este gel es capaz de retener hasta dos veces más agua que la turba (musgo que se forma en humedales y pantanos, ampliamente utilizado en agricultura), lo que le confiere buenas propiedades como hidrorretenedor (Rozo Torres, *et al.*, 2009). Por otra parte, Kadhim *et al.*, reportaron en 2024 la síntesis de hidrogeles entrecruzados con cloruro de aluminio ( $AlCl_3$ ) y se utilizó dos diferentes concentraciones de  $AlCl_3$ , consiguiendo capacidades de hidratación de hasta 966 % y 428 %, respectivamente. Este resultado expuso el impacto de la densidad de entrecruzamiento en la hidrofiliidad de los materiales poliméricos preparados.

Además, los hidrogeles sintetizados fueron aplicados en el cultivo de cebollas (al suelo) y presentaron la retención de humedad en un 57 wt. % la cual regula la liberación de agua y por ende aumenta el rendimiento de los bulbos de cebolla en un 29 wt. % en comparación con el cultivo desarrollado en suelo sin presencia de hidrogeles.

#### **I.1.10 Hidrogeles en la absorción y liberación de sustancias esenciales**

Para alcanzar una agricultura mucho más sustentable, existe una nueva tendencia que consiste en el mejoramiento de proceso de la aplicación de fertilizantes usando polímeros acarreadores. Akalin *et al.*, 2020 demostraron en este trabajo de investigación que “el diseño y la liberación controlada de los fertilizantes pueden promover un ahorro significativo en el consumo de fertilizantes y minimizar la contaminación ambiental”. En este sentido, la utilización de sistemas de encapsulación y liberación de biocidas a base de polímeros puede reducir el uso excesivo de fertilizantes y aumentar la eficiencia nutricional de la planta. Los polímeros súperadsorbentes (hidrogeles) pueden ser diseñados para adsorber y liberar nutrientes de forma controlada lo que puede mejorar la eficiencia de la fertilización en la agricultura y reducir la contaminación tanto de los suelos como el agua. Misiewicz *et al.* (2019) evaluaron la capacidad de un polímero absorbente (hidrogel) de poliacrilato de potasio como sustrato en suelo franco para mejorar la retención de agua y liberación de nutrientes en cultivos de *Zea mays* y *Pinus pinea*. En esta investigación, se llevaron a cabo pruebas en diferentes tipos de suelos (arcilla y arcilla arenoso) para evaluar la capacidad del polímero para retener agua y nutrientes, así como su efecto sobre el crecimiento y rendimiento de las plantas. Los resultados obtenidos mostraron que la aplicación del hidrogel al 0.4 wt. % en suelos francos mejora la biomasa fresca y seca del maíz en un 25 % y prolonga el tiempo de supervivencia de las plántulas de pino en un 90 % en comparación con suelos que no tuvieron hidrogeles.

Por su parte, Zai-Yin *et al.*, (2021) desarrollaron un nuevo hidrogel para la liberación controlada de fertilizante (LCFH, por sus siglas en Inglés) utilizando desechos de cuero como materia prima. Este hidrogel fue preparado aprovechando los desechos de cuero para producir un biofertilizante con alto contenido de colágeno, nitrógeno y potasio. El biofertilizante resultante exhibió una notable capacidad de absorción de agua alcanzando 2200 veces de su peso y ofrece una liberación controlada de nitrógeno y potasio durante un período de más de 40 días. Este resultado convierte

a este material en una opción de fertilizante altamente efectiva.

### **I.1.11 Liberación controlada de nutrientes a las plantas: Uso de hidrogeles**

La investigación sobre la liberación controlada de macronutrientes a las plantas sobre todo el potasio a partir de hidrogeles se centra en cómo estos materiales innovadores pueden optimizar el suministro de nutrientes esenciales para las plantas. Este mecanismo no solo asegura un suministro continuo de potasio, sino que también optimiza la absorción del nutriente. Tariq *et al.*, reportaron en 2023 que los hidrogeles generalmente conocidos por su capacidad para retener y liberar agua, así como nutrientes de manera sostenida pueden ofrecer una solución avanzada para mejorar los procesos de fertilización y la eficiencia del uso de potasio en la agricultura.

#### ***I.1.11.1 Liberación de Potasio por Hidrogeles***

Se sabe que algunos hidrogeles pueden liberar potasio de manera controlada, ajustando la tasa de liberación en respuesta a las condiciones ambientales como la humedad del medio de cultivo. Esta liberación gradual asegura que las plantas reciban una cantidad constante y adecuada de potasio evitando tanto la deficiencia como el exceso de este nutriente crucial. La tecnología basada en la síntesis de hidrogeles permite diseñar materiales con diferentes perfiles de liberación lo que es especialmente útil para adaptarse a las necesidades específicas de diferentes cultivos y condiciones de suelo (Kaur, *et al*2023).

#### ***I.1.11.2 Importancia de la liberación controlada de potasio***

*Eficiencia en el uso de nutrientes.* Los hidrogeles pueden mejorar la eficiencia del uso de potasio asegurando que una mayor proporción del nutriente proveniente del polímero esté disponible para las plantas durante períodos más prolongados. Es muy importante señalar que este proceso puede reducir la necesidad de aplicaciones frecuentes de fertilizantes y minimiza las pérdidas por lixiviación, (Nandkishore, *et al.*, 2108).

*Mejora de la salud de las plantas.* La disponibilidad continua de potasio favorece el crecimiento robusto y saludable de las plantas. El potasio es esencial para la regulación osmótica, Lu *et al.*, (2023). la fotosíntesis, y la resistencia al estrés, (Imtiaz, *et al.*, 2023). Hidrogeles con liberación controlada de

potasio pueden asegurar que estos procesos no se vean interrumpidos por fluctuaciones en la disponibilidad de nutrientes.

Hay que resaltar que esta investigación está basada en la preparación de hidrogeles que contienen grupos sulfonato de potasio y se espera que los materiales poliméricos sintetizados sean capaces de liberar gradualmente el macronutriente antes mencionado. Este mecanismo de liberación controlada de potasio puede maximizar el rendimiento y la calidad de los cultivos reduciendo la necesidad de aplicaciones frecuentes de fertilizantes y minimiza el impacto ambiental.

## **I.2 Innovaciones en la Agricultura**

### **I.2.1 Hidrogeles para la gestión de nutrientes y mitigación de metales pesados**

La agricultura moderna enfrenta el día de hoy grandes desafíos como es la búsqueda de procesos para mejorar la eficiencia durante el uso de nutrientes y minimizar el impacto ambiental caracterizado por la presencia de contaminante tóxico sobre todo los metales pesados. Por sus propiedades únicas de retención y liberación controlada de sustancias, los hidrogeles ofrecen una solución innovadora tanto para la optimización del suministro de nutrientes como para la mitigación de la contaminación provocada por metales pesados.

Los metales pesados como el plomo, el cadmio, el mercurio, el arsénico y el cromo son tóxicos y considerados como contaminantes ambientales que pueden tener efectos negativos en la salud humana y el medio ambiente. En el sector agrícola, estos metales pesados pueden acumularse en los suelos y en las plantas, lo que afecta significativamente la calidad de los alimentos producidos y repercute en la salud de los consumidores. La presencia y acumulación de metales tóxicos en la agricultura representan una preocupación creciente debido a su impacto potencial en la calidad y seguridad alimentaria.

A nivel mundial, diferentes grupos científicos han realizado extensas investigaciones sobre la presencia y acumulación de metales pesados en el sector agrícola, incluyendo a México (Covarrubias y Peña Cabriales, 2017; Galán Huertos y Romero Baena, 2008). Estas investigaciones son importantes porque evidenciaron la presencia de metales pesados en suelos. Por otra parte, propusieron nuevas estrategias para la remediación de los suelos contaminados lo cual conduce al ejercicio y mejoramiento de prácticas agrícolas más seguras y sostenibles (Covarrubias y Peña

Cabriales, 2017).

En México, se han reportado diferentes sitios contaminados por metales pesados como arsénico (As), cadmio (Cd), cobre (Cu), plomo (Pb), zinc (Zn) y hierro (Fe). Pérez Martínez y Romero (2015) investigaron y reportaron la presencia de metales en suelos de una zona minera del estado de San Luis Potosí. A falta de estudios definitivos y concluyentes sobre la extensión de la contaminación por metales pesados en suelos agrícolas, Loyde *et al.*, (2023) estimaron que alrededor del 44.9 % de los suelos agrícolas en México mostraron signos de degradación. Dentro de este porcentaje, el 17.8 % del suelo agrícola se ve afectado por degradación química que incluye la presencia de metales pesados. El nivel de contaminación del suelo agrícola con metales pesados está definido por la concentración de uno o varios elementos químicos que superan los niveles naturales considerados por las instituciones internacionales y/o nacionales.

Por otra parte, estudios recientes han revelado que aproximadamente 1,030 suelos agrícolas dedicados al cultivo de arroz y trigo en China están contaminados por metales pesados. Estos hallazgos han generado serias preocupaciones en torno a la seguridad alimentaria y la salud pública. En el caso de China, la contaminación de los suelos agrícolas por la presencia de metales pesados como el cadmio y el mercurio representa un problema grave en varias regiones debido a la industrialización y la actividad minera. Los resultados mostraron que el cadmio (Cd) era el contaminante más predominante en los suelos agrícolas según su distribución y acumulación en espacio temporal (Wang, *et al.*, 2023).

Es muy importante destacar que los contextos de aplicación de los hidrogeles para la adsorción de metales pesados en suelos agrícolas e hidroponía son muy diferentes debido a sus propiedades fisicoquímicas. La investigación y el desarrollo de hidrogeles para la adsorción de metales pesados en suelos agrícolas pueden proporcionar información valiosa para mejorar y aumentar el rendimiento de los cultivos. Los avances en la eficiencia de la adsorción de metales pesados, el diseño de nuevos hidrogeles y su aplicación en suelos agrícolas podrían ser transferibles a la investigación en hidroponía. En el caso que se desarrolle un sistema hidropónico en presencia de aguas residuales y contaminadas, la utilización de hidrogeles puede mejorar la capacidad de estos sistemas para eliminar metales pesados del entorno de cultivo. Por lo tanto, la preparación y disponibilidad de hidrogeles pueden abrir el camino para el desarrollo de cultivo hidropónico en zonas con aguas contaminadas. En esta investigación, se pretende usar los hidrogeles sintetizados en sistemas biológicos desarrollados en hidroponía.

### I.2.2 Límite permisible de metales en agua para uso y consumo humano y aguas residuales

La contaminación por metales pesados es un problema ambiental significativo que afecta tanto al sector agrícola como a los recursos hídricos utilizados para el consumo humano. Los metales pesados pueden ingresar al suelo y a los acuíferos a través de diversas fuentes como el uso de pesticidas y fertilizantes, actividades mineras, descargas de aguas residuales y actividades antropogénicas, impactando así la calidad del suelo, la salud de las plantas y la seguridad del agua para riego y consumo humano. Para mitigar estos riesgos, el gobierno mexicano ha establecido límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación, así como agua para el uso y consumo humano. La determinación de límites permisibles de metales pesados en el agua y suelos es crucial para establecer los estándares de calidad ambiental y seguridad alimentaria. Estos límites se basan en evaluaciones de riesgo y consideraciones de salud pública, y son establecidos por las autoridades ambientales y sanitarias competentes. En México, al igual que en muchos otros países, la contaminación de los acuíferos y los suelos agrícolas por metales pesados es una preocupación creciente debido al aumento de la actividad industrial, la minería y la agricultura intensiva. Los niveles de referencia de metales en el agua, según la Norma Oficial Mexicana PROY- NOM-127-SSA1-2017 (tabla 1), son los valores máximos permitidos de metales como el cadmio, el arsénico, el cobre, entre otros. Estos valores máximos representan los límites inferiores de metales pesados que pueden estar presentes en el agua destinada para consumo humano. Estos niveles de referencia se establecen con el objetivo de proteger la salud pública y prevenir riesgos para la salud asociados con la ingesta de agua contaminada.

**Tabla 1.** Niveles de referencia de metales en agua de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana PROY- NOM-127-SSA1-2017, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua.

Parámetros	Límite permisible (mg/L)
Aluminio	0.20
Arsénico	0.025
Bario	1.3
Cadmio	0.005
Cobre	2.00

Cromo total	0.05
Hierro	0.30
Manganeso	0.15
Mercurio	0.006
Níquel	0.07
Plomo	0.01
Selenio	0.04
Zinc	5.00

La tabla 2 indica la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021 que se establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. Específicamente, esta norma establece los límites permisibles para metales y cianuros en las aguas residuales que son descargadas al medio ambiente. Los límites permisibles son los niveles máximos de contaminantes que se permiten en las aguas residuales antes de que sean descargadas en cuerpos receptores, como ríos, lagos o mares. Estos límites están diseñados para proteger la calidad del agua, prevenir daños ambientales y riesgos para la salud pública. En el contexto de los metales y cianuros, la norma establece límites específicos para cada uno de estos contaminantes. Esto significa que las descargas de aguas residuales no pueden contener concentraciones de metales o cianuros que excedan los niveles establecidos en la norma. Entonces, está claramente especificado que el contenido máximo de plomo, cromo, mercurio, y otros metales no deben superar cierto valor en las aguas residuales.

**Tabla 2. Límites Permisibles para Metales y Cianuros. NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.**

Parámetros (miligramo por litro)	Ríos, arroyos, canales, drenes			Embalses, lagos y lagunas			Zonas marinas mexicanas			Suelo								
										Riego de áreas verdes			Infiltración y otros riegos			Cárstico		
	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.
Arsénico	0.2	0.3	0.4	0.1	0.15	0.2	0.2	0.3	0.4	0.2	0.3	0.4	0.1	0.15	0.2	0.1	0.15	0.2
Cadmio	0.2	0.3	<b>0.4</b>	0.1	0.15	0.2	0.2	0.3	0.4	0.05	0.075	0.1	0.1	0.15	0.2	0.05	0.075	0.1
Cianuro	1	2	3	1	1.5	2	2	2.50	34	2	2.5	3	1	1.5	2	1	1.5	2
Cobre	4	5	<b>6</b>	4	5	6	4	5	6	4	5	6	4	5	6	4	5	6
Cromo	1	1.25	1.5	0.5	0.75	1	1	1.25	1.5	0.5	0.75	1	0.5	0.75	1	0.5	0.75	1
Mercurio	0.01	0.015	0.02	0.005	0.008	0.01	0.01	0.01	0.015	0.005	0.008	0.01	0.005	0.008	0.01	0.005	0.008	0.01
Níquel	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4
Plomo	0.2	0.3	0.4	0.2	0.3	0.4	0.5	0.75	1	0.5	0.75	1	0.2	0.3	0.4	0.2	0.3	0.4
Zinc	10	15	<b>20</b>	10	15	20	10	15	20	10	15	20	10	15	20	10	15	20

Parámetros medidos de manera total	P.M: Promedio Mensual P.D: Promedio Diario V.I. Valor Instantáneo
------------------------------------	---

Valor Instantáneo (V.I.): Es el resultado obtenido del análisis de laboratorio a una muestra simple de agua residual colectada en la descarga, con motivo de una verificación realizada por la Comisión o la Procuraduría del cumplimiento de los parámetros de calidad establecidos en esta norma.

La inclusión y descripción de las normas mexicanas que regulan los niveles permisibles de metales en las descargas de aguas residuales, así como en el agua destinada al consumo humano, constituyen un marco normativo fundamental y una base sólida para evaluar la eficacia de las medidas implementadas, con una relevancia práctica significativa para la investigación en este ámbito.

### **I.2.3 Uso de hidrogeles para la adsorción de metales pesados en sistemas agrícolas**

La utilización de hidrogeles en sistemas agrícolas ha demostrado ser una solución innovadora para abordar la problemática de la contaminación por metales pesados. La inclusión de hidrogeles en estos sistemas permite una liberación controlada de agua y nutrientes mientras que actúan como "trampas" para los metales pesados, evitando que estos sean absorbidos por las raíces de las plantas. En estudios recientes, se ha demostrado que hidrogeles modificados con grupos funcionales específicos pueden adsorber eficientemente metales como  $Cd^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$  y  $Cu^{2+}$ , disminuyendo significativamente su concentración en la solución nutritiva o en el entorno agrícola (Ramírez, *et al.*, 2016; Cahuana, 2019).

Liu *et al.*, (2020) mencionaron que la presencia de cadmio puede ser un problema grave, ya que este metal pesado puede acumularse en las raíces, los tejidos y las hojas de las plantas para finalmente llegar a la cadena alimentaria. Por lo tanto, es importante implementar estrategias para reducir el contenido de cadmio en suelos agrícolas contaminados. Estos autores señalaron que actualmente existen muy pocas estrategias para la recuperación de cadmio (Cd). Por ello, reportaron en su trabajo de investigación el desarrollo de materiales compuestos a base de nanopartículas incorporadas en hidrogeles para eliminar de manera eficiente los metales pesados de las aguas residuales y esta estrategia puede considerarse como un método potencial para eliminar Cd de suelos contaminados.

### **I.2.4 *Lactuca sativa* L. como modelo vegetal para estudio de metales.**

La lechuga es una planta que presenta un ciclo de crecimiento relativamente corto, entre 8 y 12

semanas, en comparación con otros cultivos como el tomate, cuyo periodo de desarrollo oscila entre 10 y 17 semanas. Esta característica permite llevar a cabo experimentaciones y obtener resultados en plazos más reducidos. Por lo tanto, la lechuga se utiliza como un indicador eficiente de la presencia y toxicidad de metales en el ambiente, lo que facilita su empleo como modelo vegetal en investigaciones científicas actuales.

Los modelos vegetales son organismos utilizados como herramientas para el estudio de diversos factores ambientales, incluyendo la presencia de metales pesados en el medio ambiente. Estos organismos, como la lechuga, presentan una alta sensibilidad a la acumulación de metales pesados en sus tejidos, lo que los convierte en instrumentos efectivos para el monitoreo y evaluación de la contaminación ambiental. Guzmán-Morales *et al.*, (2021) reportó el cultivo de lechuga bajo condiciones de contaminación por metales pesados, demostrando que esta planta actúa como acumuladora de metales como Mn, Fe, Ni, Co y Pb, concentrándolos específicamente en su parte aérea, particularmente en las hojas. Por su parte, Loredó *et al.*, (2022) observaron la acumulación de metales como Cd, Cr, Pb y Zn en cultivos de lechuga desarrollados en presencia de aguas tratadas provenientes de una planta de tratamiento de aguas residuales. Entre las respuestas medibles en los modelos vegetales, se puede mencionar el índice de toxicidad por metales el cual está constituido por los índices de transferencia y translocación, además de las respuestas como biomasa y longitud de raíces. La variedad de tiempos de exposición a metales va del orden de dos días hasta dos meses. Observaron una bioacumulación de metales pesados en las hojas (parte comestible de la lechuga) el cual es atribuido a la capacidad de dilución de los iones metálicos desde las raíces hasta los tejidos de la planta.

### **I.2.5 Uso de hidrogeles en modelos vegetales crecidos en hidroponía**

El empleo de modelos vegetales cultivados en sistemas hidropónicos con la incorporación de hidrogeles representa una metodología novedosa en la investigación agrícola y ambiental. Debido a su capacidad para absorber agua y a sus propiedades, tales como su estructura de red y elasticidad, los hidrogeles tienen una amplia gama de aplicaciones, incluyendo su uso en la investigación científica enfocada en el desarrollo de plantas. La cantidad de agua que pueden retener en estos sistemas varía en función de las características de los polímeros y la densidad de la red, siendo generalmente mayor que la fracción de polímero (Lin, *et al.*, 2023).

Andrada *et al.*, en 2018 evaluaron la capacidad de retención hídrica de copolímeros formados de

acrilamida y acrilato de potasio utilizado como mejorador de la implantación y crecimiento de un cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.) bajo condiciones controladas. En su estudio, compararon dos tratamientos con dosis de 25 y 50 kg.ha<sup>-1</sup> *versus* un testigo de control (sin hidrogel) para determinar el impacto de la presencia del hidrogel en la producción de lechuga de los tratamientos. Observaron que el cultivo de lechuga desarrollado en suelo en presencia del copolímero presentó mayor emergencia, crecimiento, supervivencia de plantas y mejores rendimientos del cultivo.

### **I.2.6 Potenciando la agricultura hidropónica: El uso estratégico de hidrogeles.**

En general, la hidroponía es un método de cultivo de plantas que prescinde del suelo y utiliza soluciones nutritivas en lugar de tierra para suministrar los nutrientes necesarios para el crecimiento de las plantas, Zárate (2015). Es una tecnología bien desarrollada y ampliamente utilizada en laboratorios agrícolas e invernaderos debido a sus beneficios, se puede producir rendimientos más altos por unidad de área cultivada. Esta tecnología puede ser de gran relevancia para mitigar la problemática de la alimentación mundial. En comparación con la agricultura convencional desarrollada en suelos, la hidroponía requiere una menor cantidad de agua en este sistema de cultivo ya que el agua se recircula en el sistema y no se pierde por lixiviación. Aunque la hidroponía utiliza menos agua en comparación con la agricultura tradicional, es importante gestionar adecuadamente el drenaje y las salmueras para garantizar un crecimiento saludable de las plantas y prevenir problemas de toxicidad por acumulación de sales, (Albuja, *et al.*, 2021). Un manejo cuidadoso de estos aspectos puede ayudar a maximizar los beneficios de la hidroponía en términos de uso eficiente del agua y calidad de los cultivos. Se puede controlar con precisión la cantidad de nutrientes, concentración de oxígeno y pH del agua, lo que permite optimizar las condiciones de crecimiento de las plantas, tener cultivos de mayor calidad y un aumento en la producción. Una de las ventajas de los sistemas hidropónicos radica en la implementación en diferentes tipos de lugares (exteriores o interiores) permitiendo un control ambiental completo y un uso optimizado del espacio.

En términos de sistema de exposición a metales, los sistemas hidropónicos marcan una diferencia en cuanto a toxicidad en contraste a sistemas con suelo desde que la materia orgánica juega un papel en la especiación e interacción entre los metales pesados, y la posterior interacción con el modelo vegetal (Park, 2020; Di Salvatore, *et al.*, 2019).

Di Salvatore *et al.*, (2021) reportaron un incremento significativo en la toxicidad del modelo vegetal desarrollado en un sistema hidropónico en comparación con un sistema similar llevado a cabo en

suelo. Este aumento puede atribuirse a la mayor disponibilidad de iones metálicos en el medio acuoso, lo que permitió realizar una cuantificación más precisa de los metales remanentes. El nivel de extracción y cuantificación de metales en sistemas biológicos, ya sean hidropónicos o en suelo, depende de la metodología empleada. Se ha demostrado que la cuantificación de metales es inferior en suelos que, en medios acuosos, como los sistemas hidropónicos. Por esta razón, se ha recomendado el estudio de la toxicidad, acumulación y tolerancia de metales en medios controlados, como es el caso de los sistemas hidropónicos (Kashem, *et al.*, 2008).

### **I.2.7 Estudios en hidroponía usando hidrogeles**

Debido a la contaminación de los acuíferos por metales pesados, se realizaron diseños de desarrollo de sistemas hidropónicos en presencia de hidrogeles utilizados como soporte para el crecimiento de diversos modelos vegetales, tanto con fines comerciales (Vo *et al.*, 2007) como para realizar estudios sobre el ambiente radicular (Ma, *et al.*, 2023). Sin embargo, el uso de hidrogeles para el crecimiento de plantas en hidroponía presenta ciertos retos como el estrés sobre las raíces de las plantas causado por la liberación de monómeros tóxicos (Mroczek, *et al.*, 2014). A pesar de estas limitaciones, los hidrogeles ofrecen la ventaja de poder ser funcionalizados para múltiples propósitos de investigación, algo que resulta imposible con sustratos convencionales como el suelo. Por ejemplo, los hidrogeles basados en poliacrilamida (PAM) y poliácido acrílico han sido empleados para estudiar la dosificación de agentes purificantes y mantener la calidad del agua en sistemas hidropónicos, como lo describen (Wang, *et al.*, 2018). Este enfoque ha mejorado la eficiencia del sistema, asegurando una calidad óptima del agua para el desarrollo de las plantas. En este contexto, el estudio de la interacción entre metales y la dosificación de nutrientes en sistemas hidropónicos con hidrogeles representa una de las tendencias más innovadoras en la investigación agrícola y ambiental.

### **I.2.8 Relevancia del diseño de hidrogeles multifuncionales en la presente investigación: adsorción de metales, liberación de nutrientes y retención de agua.**

Basado en una revisión exhaustiva de la literatura, no se encontró ningún reporte relacionado a la preparación y evaluación de polímeros tipos hidrogeles que poseen las tres características mencionadas a continuación: 1) gran capacidad de retención de agua, 2) excelente removedor de metales pesados y 3) fuentes para la liberación de potasio un macronutriente esencial para el

desarrollo de las plantas. Por esta razón, la importancia de esta investigación radica en la búsqueda, diseño y desarrollo de nuevos hidrogeles capaces de cumplir las 3 características antes mencionadas. El diseño y la obtención de estos tipos de materiales hidrogeles multifuncionales pueden ser útiles para enfrentar simultáneamente múltiples desafíos agrícolas muy comunes. La liberación controlada de nutrientes, como el potasio, garantiza que las plantas reciban un suministro continuo y equilibrado de nutrientes esenciales. También, maximiza la absorción de estos nutrientes provocando una mejora en el crecimiento de las plantas lo cual puede facilitar un aumento en el rendimiento de los cultivos. Adicionalmente, la notable capacidad de absorción de agua de estos hidrogeles asegura una retención hídrica óptima y este parámetro es crucial para favorecer un uso eficiente del vital líquido. Al integrar estas propiedades en un solo material, los hidrogeles multifuncionales pueden optimizar el rendimiento agrícola y promover prácticas más sostenibles, reduciendo la necesidad de aplicaciones frecuentes de fertilizantes y minimizando el impacto ambiental.

## II. HIPÓTESIS

La presencia y distribución de los grupos funcionales amina y sulfonato, así como un mayor porcentaje del grado de entrecruzamiento en la estructura química de polímeros hidrosolubles tipos hidrogeles basados en poliacrilamida favorecerán la adsorción de metales pesados (Cu, Zn y Cd). Dichos materiales poliméricos tendrán la capacidad para retener de manera reversible agua y liberar potasio en solución nutritiva para permitir el cultivo de la lechuga (*Lactuca Sativa* L) en sistemas hidropónicos.

## III. OBJETIVOS

### III.1 Objetivo general

Determinar la capacidad de poliacrilamidas hidrosolubles tipos hidrogeles en la retención de agua y

la evaluación en la disponibilidad de metales pesados, así como la liberación de potasio en cultivo de lechuga (*Lactuca Sativa* L.) desarrollados en sistemas hidropónicos.

### III.1.1 Objetivos particulares

- Preparar polímeros hidrosolubles lineales usando monómeros derivados de la acrilamida.
- Sintetizar polímeros hidrosolubles entrecruzados (hidrogeles) mediante la técnica de polimerización RAFT (Transferencia Reversible por Adición-Fragmentación).
- Realizar la caracterización de los polímeros mediante Infrarrojo (IR), Resonancia Magnética Nuclear (RMN) y Cromatografía de exclusión de tamaño (SEC).
- Cuantificar la capacidad de retención de humedad, disponibilidad de potasio y retención de Cu, Zn y Cd a partir de los polímeros hidrosolubles.
- Medir el efecto de los metales (Cu, Zn y Cd) en el desarrollo de la lechuga en presencia de polímeros hidrosolubles.

## IV MATERIALES Y MÉTODOS

### IV.1 Lugar de Experimentación

El trabajo experimental se realizó principalmente en Planta piloto 2, laboratorios de Biociencias y Agrotecnología (Edificio F) e Invernadero. La caracterización del polímero se realizó en equipos RMN (Edificio D), FTIR (Edificio E) y SEC (Edificio H), análisis de muestras ICP-OES (edificio E) del CIQA (Centro de Investigación en Química Aplicada) ubicada en la ciudad de Saltillo, Coah.

### IV.2 Reactivos

Los reactivos utilizados para la síntesis de homopolímeros y copolímeros tales como: monómeros, iniciador térmico, acetona, agua deuterada y sales de metales son de grado reactivo (alta pureza en comparación con grado industrial). En contraste, los reactivos empleados en las soluciones nutritivas no cumplen con los estándares de grado reactivo, pero son igualmente apropiados y adecuados para su uso en los procesos experimentales. La tabla 3 indica la pureza y nombre del proveedor. El agente de transferencia RAFT di metilo ácido tritio carbonato (DMAT) fue sintetizado en el laboratorio de

Procesos de Polimerización del Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA). En todos los casos, los reactivos fueron utilizados sin una previa purificación.

Tabla 3. Lista de reactivos, pureza y proveedor.

Reactivo	Pureza (%)	Proveedor
Dimetilacidotritiocarbonato (DMAT)		Sintetizado en CIQA
4,4'-azobis-(4-ácido cianovalérico)(ACVA)	≥ 98	Merck (antes Sigma-Aldrich)
1,3,5-Trioxano	≥ 99	Merck
Acrilamida	≥ 98	Merck
Ácido 2-acrilamida-2metil-1propanosulfónico (AMPS)	> 99	Merck
Hidróxido de Potasio	> 97	Jalmeck
Oxido de Deuterio	≥ 99.9	Merck
N', N'-Metilen-bis-acrilamida	≥ 99	Merck
Sulfato de Cobre	≥ 98	Merck
Sulfato de Zinc	≥ 99	Merck
Sulfato de Cadmio	≥ 99	Merck
Acetona	≥ 99	Jalmeck
Argón	UAP	INFRA
Nitrato de Calcio	N 15.5 CaO 26	YaraTera
Nitrato de Potasio	N 12 K2O 45	Greenhow
Fosfato monoamónico	N 12 (P2O5) 61	Ultrasol
Sulfato de Magnesio	98.8	Sulmag
Ácido Fosfórico	≥85.0-87.0	Delta
Agua Desionizada		Merck (obtenido en CIQA equipo Milli-Q)
Ácido Clorhídrico	36.5-38	Merck (antes Sigma-Aldrich)
Ácido Nítrico	69	Emsure
Enraizador	N-P-K-Mg-S (9-45-11-1-0.80)	Raizal 400
Turba de <i>Sphagnum</i> (Peat moss)		Premium
Perlita mineral		Termolita

### **IV.3 Material biológico**

Se usaron semillas de lechuga orejona (*Lactuca sativa* L.) marca Hortaflores, originaria de Francia con lote N294 y distribuida por Rancho Los Molinos, las mismas fueron adquiridas en tienda de uso comercial.

### **IV.4 Equipos y Caracterización**

#### **IV.4.1 Resonancia Magnética Nuclear (RMN)**

La resonancia magnética nuclear (RMN) es una técnica espectroscópica que se utilizó para caracterizar el homopolímero (vía RAFT) PAM (macro RAFT), copolímero en bloque (vía RAFT) PAM-*b*-PAMPS-K, copolímero aleatorio (vía RAFT) PAM-*r*-PAMPS-K y copolímero (convencional) PAM-*r*-PAMPS-K. Para la preparación de las muestras, se dejaron en agitación (en agua deuterada) una cantidad de 20 mg del polímero hasta su completa disolución. Posterior a ello, parte de la muestra se colocó en un tubo de RMN para su análisis y caracterización por RMN <sup>1</sup>H. Los espectros fueron obtenidos a temperatura ambiente con un espectrómetro Bruker Avance III HD 400N de 400 MHz. Los datos fueron procesados mediante el software TopSpin de la marca Bruker.

#### **IV.4.2 Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FT-IR)**

Los espectros de infrarrojo fueron obtenidos usando una muestra pulverizada de los polímeros a través de un espectrofotómetro de la marca Thermo Scientific modelo Nicolet Is50. Las mediciones fueron realizadas en modo ATR (Attenuated Total Reflectance) con soporte de diamante, 200 scans con una resolución de  $\pm 4$  cm<sup>-1</sup> y un rango entre 4000–500 cm<sup>-1</sup>. Para el análisis, el polímero sólido y secado por liofilización fue colocado sobre el soporte de diamante y los datos fueron procesados mediante el software Omnic y Origin.

#### **IV.4.3 Cromatografía por Exclusión de Tamaño (SEC)**

La técnica de cromatografía por exclusión de tamaño (SEC, por sus siglas en inglés), también conocida como cromatografía de exclusión molecular (SEC) o cromatografía por permeación en gel (GPC) se usó para determinar los pesos moleculares promedio en peso ( $M_w$ ), distribución de pesos

moleculares ( $D = M_w/M_n$ ) y pesos moleculares promedio en número ( $M_n$ ). Las muestras poliméricas se analizaron *vía* SEC en un equipo de la marca Agilent Technologies serie 1260 Infinity acoplado a un sistema de HPLC equipado con detectores de índice de refracción y ultravioleta (UV) y tres series de columnas: Columna AQUA-GEL-OH 30, 300x7.5mm, rango de peso molecular 100 30,000 g/mol, 8  $\mu$ m, Columna AQUA-GEL-OH 40, 300x7.5mm, rango de peso molecular 10,000-200,000 g/mol, 15  $\mu$ m, Columna AQUA-GEL-OH 50, 300x7.5mm, rango de peso molecular 50,000-1,000,000 g/mol, 15  $\mu$ m. El análisis se realizó a una temperatura de 40°C, un flujo de 0.5 mL/min, un volumen de inyección de 100  $\mu$ L y como eluyente una solución buffer pH = 7. Las muestras fueron preparadas a una concentración de 2mg/ml, y posterior se filtró con una membrana con un tamaño de poro 0.2  $\mu$ m.

#### **IV.4.4 Análisis elemental mediante ICP-OES**

En esta investigación, se empleó la técnica de Plasma Acoplado Inductivamente con Espectrometría de Emisión Óptica (ICP-OES, por sus siglas en Ingles) para la cuantificación de elementos en diferentes muestras. El ICP-OES es una técnica analítica moderna y versátil que ha permitido el análisis simultáneo de múltiples elementos, con un amplio rango de detección que va desde partes por billones (ppb) hasta partes por millón (ppm).

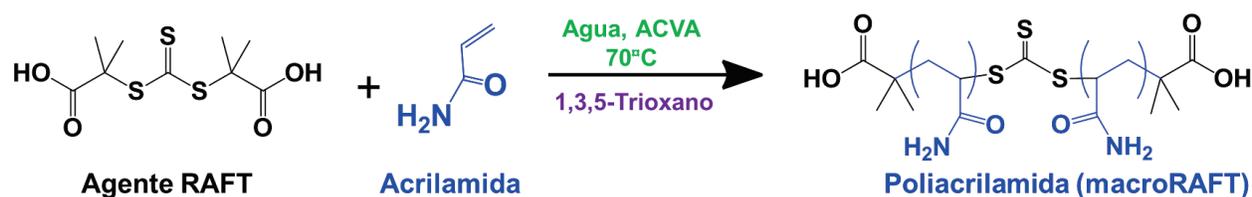
Análisis por ICP-OES: Las muestras digeridas fueron analizadas utilizando un espectrómetro ICP-OES (Thermo Scientific, USA. Modelo Icap7400 Duo). El sistema fue calibrado utilizando estándares de concentración conocida para cada elemento de interés. Las muestras fueron inyectadas en el plasma inductivamente acoplado, donde los elementos se atomizaron y emitieron luz en longitudes de onda características. La emisión de luz fue detectada y cuantificada por el espectrómetro.

### **IV.5 Procesos de síntesis**

#### **IV.5.1 Síntesis de homopolímero PAM *vía* RAFT**

La síntesis del homopolímero poli(acrilamida) (PAM) se llevó a cabo mediante la técnica de polimerización por adición fragmentación con transferencia reversible de cadenas (RAFT), como se muestra en el esquema de reacción de la Figura 3. Este proceso se caracteriza por el uso de un agente de transferencia de cadena (CTA). La reacción de polimerización RAFT de monómero (acrilamida),

denominada macroRAFT (término referente al uso de un polímero preformado como agente de transferencia de cadena en la polimerización RAFT) se llevó a cabo en presencia de iniciador térmico 4,4'-Azobis-4"-ácidociano-valérico (ACVA), 1,3,5-Trioxano como referencia interna en medio acuoso a una temperatura de 70 °C. En esta primera etapa, la reacción de polimerización se realizó en un reactor enchaquetado de tres bocas de marca SEV-PRENDO de 500 mL conectado a un baño de recirculación y equipado en cada boca, con un refrigerante, agitador mecánico y septa, respectivamente.



*Figura 3. Representación esquemática de la síntesis del homopolímero poliacrilamida (PAM) vía RAFT (Macro RAFT).*

Formación del Polímero:

*Preparación de la Solución Inicial:* En un vaso de precipitado, se disolvieron 0.3 g del agente de transferencia de cadena (CTA), 0.03 g del iniciador (ACVA), 160 g del monómero (acrilamida) en 400 ml (g) de agua destilada. Se agregaron 3 g de 1,3,5-trioxano como referencia interna para determinar la conversión de monómero mediante la espectroscopía RMN <sup>1</sup>H, hasta alcanzar un volumen de 500 ml.

*Reacción de Polimerización:* La solución totalmente homogénea fue colocada en el reactor y se burbujeó argón durante 30 minutos para obtener atmosfera inerte. Después de este tiempo, se inició la reacción de polimerización calentando el baño de recirculación a una temperatura de 70 °C. La reacción se mantuvo bajo agitación mecánica utilizando una propela a 250 rpm y burbujeó de argón durante un tiempo de 6 h (como se muestra en la Figura 4).

*Terminación y Aislamiento del Polímero:* Cumpliendo las 6 h, se detuvo la reacción de polimerización apagando el sistema de calentamiento. El polímero resultante fue recuperado por precipitación y purificado mediante tres lavados en acetona, se filtró y secó en un horno de vacío de la marca Lab-Line 3608-5 a una temperatura de 50 °C por 24 h. Posteriormente, el polímero macroRAFT (polímero inicial o "macroiniciador" obtenido mediante la **polimerización RAFT**) fue

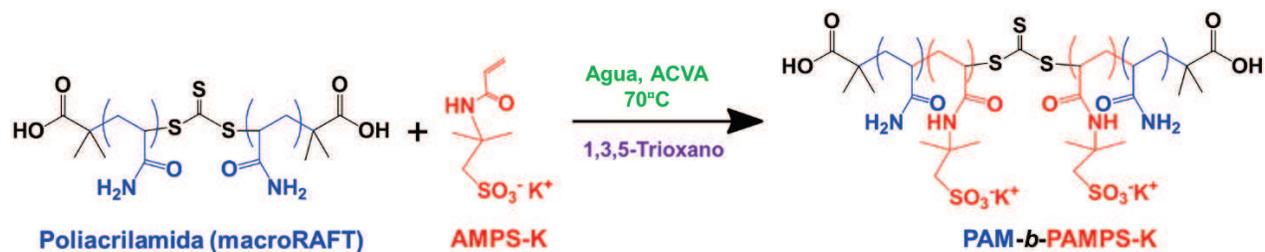
caracterizado mediante técnicas analíticas de RMN  $^1\text{H}$  (Resonancia Magnética Nuclear de Protón) utilizando agua deuterada como solvente, FT-IR (Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier) y SEC (Cromatografía de Exclusión por Tamaño).



*Figura 4. Sistema de reacción empleado para la síntesis del homopolímero (macroRAFT).*

#### IV.5.2 Síntesis de copolímeros en bloque PAM-*b*-PAMPS *vía* RAFT

La síntesis del copolímero en bloque poli(acrilamida-*b*-poli(ácido-2-acrilamido-2-metilpropanosulfónico) (PAM-*b*-PAMPS) se llevó a cabo utilizando la técnica de polimerización RAFT, como se ilustra en la Figura 5.



*Figura 5. Representación esquemática de la preparación del copolímero en bloque PAM-*b*-PAMPS-K *vía* RAFT.*

Formación de Bloques.

*Preparación de la Solución Inicial:* Se disolvió en un reactor enchaquetado (mismas características y condiciones que en la reacción anterior) 50 g de macroRAFT (poliacrilamida, macromolécula que lleva el grupo terminal RAFT) en 200 ml de agua destilada, 19 mg de ACVA como iniciador, 119 g de solución de AMPS (solución ajustada con hidróxido de potasio (KOH) a pH = 8) y se adicionó agua destilada hasta alcanzar un volumen de 500 ml.

*Formación del Primer Bloque (PAM):* La polimerización de la acrilamida se inicia utilizando el agente RAFT para controlar el proceso y producir un bloque homopolimérico de poliacrilamida (PAM).

*Formación del Segundo Bloque (PAMPS):* Posteriormente, se añade el monómero 2-acrilamido-2-metilpropanosulfónico (AMPS) para crear el segundo bloque del copolímero. La polimerización se mantiene bajo control mediante RAFT, permitiendo obtener un bloque con la composición específica requerida.

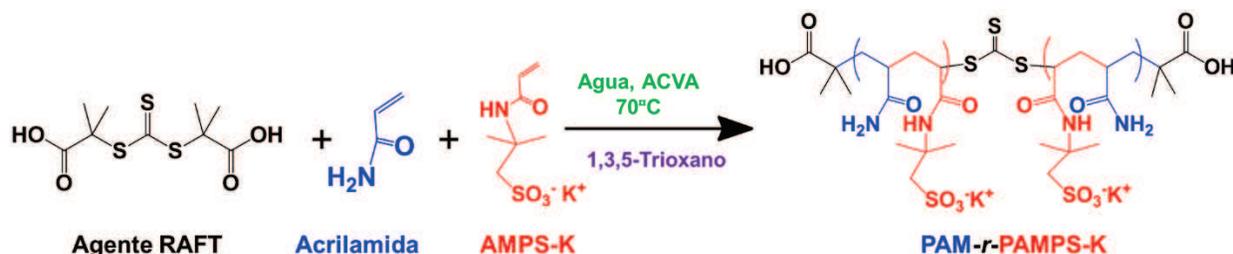
*Terminación y Aislamiento del Copolímero:* La reacción se detuvo después de las 6 horas de polimerización apagando el sistema de calentamiento. El copolímero fue aislado por precipitación tres veces en acetona, filtrado y secado en una estufa de vacío a 50 °C durante 24 horas. Una vez obtenido, el copolímero fue caracterizado mediante análisis espectroscópicos de RMN <sup>1</sup>H y FT-IR y (SEC).

#### **IV.5.3 Síntesis de copolímero aleatorio PAM-*r*-PAMPS vía RAFT**

La síntesis de copolímeros aleatorios de poliacrilamida (PAM) y poliácido-2-acrilamido-2-metilpropanosulfónico (PAMPS) se llevó a cabo mediante la técnica de polimerización RAFT, como se indica en la Figura 6. Esta reacción puede ser considerada como el primer paso (referencia) para preparar los copolímeros aleatorios lineales y ramificados sintetizados mediante polimerización radicalica convencional y altamente diseñados en el presente trabajo de investigación.

*Preparación de la Solución:* Se disolvieron 80 g de AM, 26.5 g de AMPS-K (obtenido de la neutralización de AMPS en presencia de KOH), 1.5 g de 1,3,5- Trioxano, 0.015 g de ACVA en 500 mL de agua destilada y la solución fue colocada en un reactor enchaquetado (mismas condiciones y características descritas anteriormente). Se detuvo la reacción de polimerización apagando el sistema de enfriamiento y el copolímero fue obtenido por precipitación tres veces en acetona, filtrado y

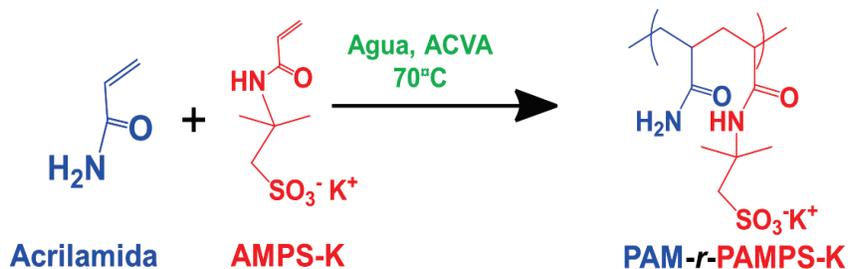
secado en una estufa de vacío a 50 °C durante 24 horas. El copolímero aleatorio fue caracterizado mediante análisis espectroscópicos IR y RMN, así como por SEC.



*Figura 6. Ruta descriptiva de la síntesis del copolímero aleatorio lineal PAM-*r*-PAMPS-K vía RAFT.*

#### IV.5.4 Síntesis de copolímero aleatorio PAM-*r*-PAMPS vía polimerización radicalica convencional

Por otra parte, la síntesis del copolímero aleatorio PAM-*r*-PAMPS-K (copolímero de acrilamida y ácido 2-acrilamido-2-metilpropanosulfónico potásico) se realizó mediante polimerización radicalica convencional, un método que involucra la formación de radicales libre para iniciar y propagar la reacción de polimerización. En esta síntesis, se utilizó 4,4'-Azobis-4"-ácidociano-pentanoico (ACVA) como iniciador, el cual se descompone térmicamente para generar los radicales libres necesarios. Los monómeros AMPS-K y AM fueron sometidos a polimerización sin la presencia de agente RAFT, manteniendo las mismas condiciones y concentraciones que en las polimerizaciones RAFT. En general, la Figura 7, esquematiza la copolimerización aleatoria de la acrilamida (en azul) y el AMPS-K (en rojo) para formar el copolímero aleatorio PAM-*r*-PAMPS-K, utilizando agua como medio de reacción y ACVA como iniciador térmico a 70°C. La acrilamida aporta grupos amida (-NH<sub>2</sub>), mientras que el AMPS-K introduce grupos sulfonato (-SO<sub>3</sub><sup>-</sup> K<sup>+</sup>) en la cadena polimérica.



*Figura 7. Síntesis de copolímeros aleatorios PAM-*r*-PAMPS-K mediante la polimerización radicalica convencional.*

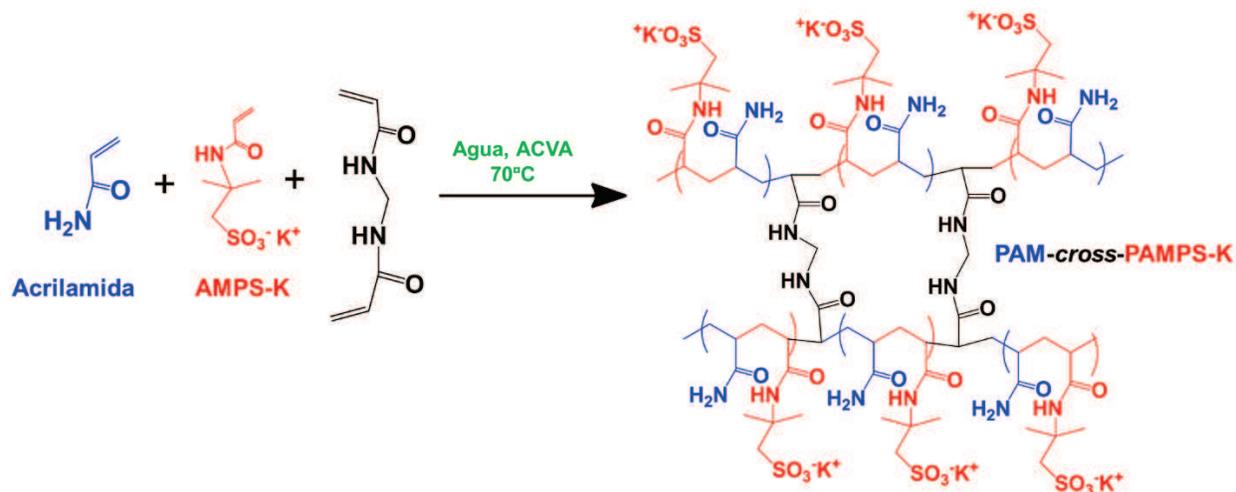
Los polímeros han sido caracterizados fisicoquímicamente para determinar sus estructuras y propiedades.

#### **IV.5.5 Síntesis de copolímero aleatorio ramificado (hidrogeles)**

La preparación de los hidrogeles fue llevada a cabo siguiendo un procedimiento similar a la síntesis de copolímero aleatorio *vía* polimerización radicalica convencional calculando concentraciones molares similares. En un vaso de precipitado, se disolvieron AM, AMPS-K, ACVA y bis-acrilamida de metileno (MBA, por sus siglas en Ingles) en 500 mL de agua (Figura 8). Una vez disuelta, se traspasó la solución completamente diluida al reactor. Se burbujeó argón durante 30 minutos para obtener una atmosfera inerte y después se inició la reacción de polimerización. En los primeros 60 minutos, se observó la formación de un bulto sólido atribuido a la formación de hidrogeles. Se dejó la reacción durante 6 horas para la consumación total de los reactivos presentes. Se apagó el sistema de calentamiento para detener el proceso de polimerización y el polímero resultante fue lavado 3 veces en acetona, secado en una estufa de vacío a 50 ° C durante 24 horas.

Posteriormente, se prepararon tres hidrogeles adicionales y el proceso de obtención fue similar al anterior. En este caso, se variaron cantidades del monómero entrecruzante (MBA) para obtener hidrogeles con mayor grado de entrecruzamiento. Al final, se prepararon 4 hidrogeles o copolímeros denominados como CPE1, CPE2, CPE3 y CPE4, con grados de entrecruzamientos de 5, 10, 15 y 25 wt% del MBA. Estos hidrogeles fueron diseñados para su aplicación como soporte en el cultivo de la *Lactuca sativa* L. (lechuga) en medio hidropónico y para analizar su efecto en presencia de metales pesados (Cu, Zn y Cd) durante el desarrollo de la planta, así como su capacidad de retención de humedad, retención de Cu, Zn y Cd, y la disponibilidad de potasio en solución acuosa.

La síntesis esquematizada en la Figura 8 muestra la copolimerización de acrilamida (AM) y 2-acrilamido-2-metilpropanosulfonato de potasio (AMPS-K) en presencia de bisacrilamida (MBA) como agente entrecruzante, utilizando el iniciador térmico ACVA a 70°C. El resultado es la formación de un copolímero entrecruzado (PAM-r-PAMPS-K), en el que las unidades de acrilamida y AMPS-K están unidas en una red tridimensional, formando un hidrogel.



*Figura 8. Ruta descriptiva de la síntesis del copolímero aleatorio ramificado PAM-*r*-PAMPS-K.*

## IV.6 Propiedades de los Hidrogeles

### IV.6.1 Índice de hidratación de hidrogeles de PAM-*r*-PAMPS-K

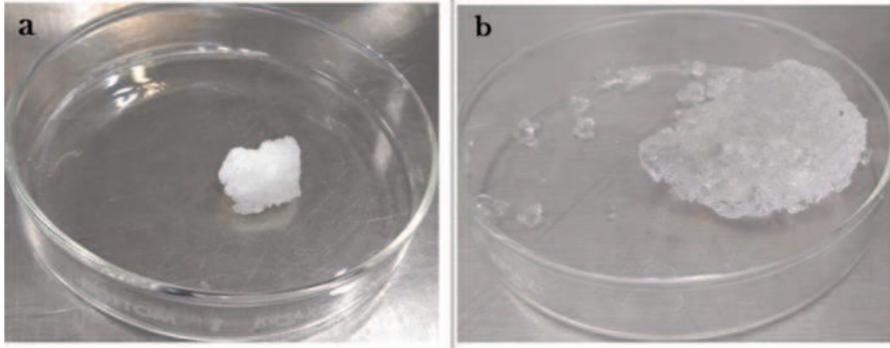
Como se ha mencionado anteriormente, los hidrogeles se distinguen por su capacidad para absorber y retener agua. En este estudio, se evaluó el índice de hidratación de hidrogeles con diferentes grados de entrecruzamiento. Se tomó 1 gramo de hidrogel seco (ver Figura 9a) y se sumergió en un exceso de agua destilada durante 72 horas. Luego de este período, se retiró el hidrogel del agua y se midió su peso húmedo (ver Figura 9b).

En la Figura 9a se observa el hidrogel en estado seco, compacto, de color blanco y con una estructura sólida en una caja de Petri, mostrando su tamaño y forma originales. La Figura 9b presenta el hidrogel tras la hidratación y se puede observar un aumento significativo de tamaño del material con una estructura más grande, esponjosa y menos densa. Su apariencia translúcida y textura más suave indican la absorción de una cantidad considerable de agua.

A partir de los valores de los pesos secos y mojados de los hidrogeles, se procedió al cálculo del índice de hinchamiento usando el método gravimétrico, de cada hidrogel por medio de la ecuación (Ec. 1) reportada por Dipankar *et al.*, 2021.

$$\text{Índice de hidratación (\%)} = \frac{\text{peso humedo} - \text{Peso seco}}{\text{peso seco}} \times 100 \quad \text{Ec. (1)}$$

Hay que señalar que los experimentos fueron realizados en condiciones controladas de temperatura (27 °C), para obtener resultados más precisos y reproducibles: Se repitió el experimento por triplicado para obtener datos promedio y reducir la variabilidad.



**Figura 9.** Hidrogel de poli(AM-co-AMPS-K): a) hidrogel seco, b) hidrogel hidratado.

#### IV.6.2 Porcentaje de pérdida de agua por evaporación en hidrogeles de PAM-*r*-PAMPS-K

Las moléculas de agua absorbidas en la estructura de hidrogeles pueden evaporarse gradualmente. Por ello, se realizó una prueba para determinar el porcentaje de pérdida de agua (%) en función de tiempo. El experimento se llevó a cabo como se describe a continuación. Una cantidad predeterminada (cercano de 1 gramo) de hidrogel fue pesado hidratado con agua durante 72 h. Pasando ese tiempo, el hidrogel completamente hidratado fue colocado en una caja Petri y pesado para determinar su peso inicial. Los hidrogeles hidratados fueron expuestos a condición de temperatura constante de 27 °C y presión atmosférica del ambiente. Por intervalos de tiempo de una semana hasta tres meses (12 semanas), se realizó el pesaje de las muestras para determinar el peso del material después de cada tiempo.

Estas pruebas fueron realizadas en agua destilada (Milli-Q), solución nutritiva con y sin sales de potasio. Se realizaron tres replicas con el propósito de obtener datos reproducibles y confiables. El porcentaje de agua por evaporación (destilada, solución nutritiva con sin potasio) fue calculada a partir de la ecuación (Ec. 2) exhibida a continuación.

$$\%Per_{a_{evap}} = \left( \frac{P_{h_{t_0}} - P_{h_{t_i}}}{P_{h_{t_0}}} \right) \times 100 \quad \text{(Ec. 2)}$$

Per<sub>aevap</sub>: es el porcentaje de agua perdida por evaporación, Ph<sub>0</sub>: peso inicial del hidrogel hidratado a tiempo t<sub>0</sub>, Ph<sub>i</sub>: peso del hidrogel al inicio del hidrogel a tiempo t<sub>i</sub> después de que ha perdido agua por evaporación. Este cálculo permite determinar la cantidad de agua que el hidrogel ha perdido en relación con su peso inicial en estado hidratado, expresado como un porcentaje

#### IV.6.3 Retención de agua en copolímeros CPE1, CPE2, CPE3 y CPE4

Los hidrogeles son caracterizados por su capacidad para retener grandes cantidades de agua durante cierto tiempo y condiciones muy específicas. Para determinar la pérdida de agua forzada por evaporación a diferentes temperaturas, aproximadamente 2 g hidrogeles fueron mojados en agua destilada y pesado para obtener el peso inicial. Las cajas Petri con los hidrogeles hidratados fueron colocadas en un horno de secado de la marca Thermo Scientific Modelo Heratherm OGS60. El horno fue calentado y estabilizado a una temperatura muy específica de 30, 40, 50 y 60 °C. A tiempo predeterminado (3, 6, 12 y 24 h) y temperatura específica, cada muestra fue pesada para determinar el contenido de agua remanente en el hidrogel y la cantidad de agua que se perdió por evaporación. La capacidad de los hidrogeles CPE1, CPE2, CPE3 y CPE4 para retención agua se calculó de acuerdo con la ecuación (2) reportada reportado en 2023 por Tian *et al.*

$$\%Per_{a_{evap}} = \left( \frac{Ph_{t_0} - Ph_{t_i}}{Ph_{t_0}} \right) \times 100 \quad (\text{Ec. 2})$$

#### IV.6.4 Adsorción de metales pesados en hidrogeles

Antes de proceder a la evaluación de los hidrogeles en sistemas biológicos usando lechuga en hidroponía, se realizó un ensayo para determinar la capacidad de adsorción de metales pesados (Cd, Cu y Zn) de los hidrogeles. Los experimentos fueron realizados de la siguiente manera. En un vial, se pesó 10 mg de la sal de sulfato de cada metal (Cd, Cu y Zn) y se agregaron 100 mL de agua. A esta solución, se agregó 0.5 g de cada hidrogel de diferente grado de entrecruzamiento y la solución se mantuvo bajo agitación magnética durante 24 h (ver Figura 10).

Posterior, las soluciones fueron filtradas usando un papel filtro de la marca Whatman con tamaño de poro 50. La medición de la concentración de metal antes y después de la mezcla de la solución de sal de metal en presencia de hidrogel fue realizada en un equipo de espectrometría de plasma acoplado inductivamente (ICP, por sus siglas en inglés) de la marca Thermo Scientific, USA y

modelo Icap7400 Duo. Antes de realizar el análisis de la concentración de cada metal, se desarrolló una curva de calibración y las mediciones fueron llevadas a cabo a temperatura ambiente. La concentración de metal adsorbida fue medida en ppm y se determinó el porcentaje o capacidad de absorción de metales de los hidrogeles a partir de la ecuación 3.

**Preparación del Hidrogel:** Se pesaron 0.5 g de cada hidrogel (CPE1, CPE2, CPE3 y CPE4) y se colocaron en recipientes de reacción.

**Preparación de Soluciones de Metales Pesados:** Se prepararon tres soluciones de cadmio, cobre y zinc, cada una con una concentración de 10 mg/L en 100 ml de agua Milli Q (agua bidestilada).

**Contacto Hidrogel-Solución:** Los hidrogeles se sumergieron en las soluciones de metales pesados y se agitaron suavemente durante 24 horas.

**Análisis de Metales Pesados:** Se analizó la concentración de metales en la solución antes y después del contacto mediante una curva de calibración multielemental.

**Cálculos:** Se determinó la capacidad de adsorción de metales por los hidrogeles, expresada en ppm. Para la cual se utilizó la ecuación (3).

$$\% \text{ de adsorción} = \left( \frac{C_i - C_f}{C_i} \right) \times 100 \quad (\text{Ec. 3})$$

$C_i$  = concentración inicial,  $C_f$  = concentración final, CA = capacidad de adsorción

En esta ecuación CA representa la capacidad de adsorción de metal del hidrogel,  $C_i$  = concentración inicial de metal en la solución sin hidrogel y  $C_f$  = concentración de metal en la solución salina en presencia del hidrogel.



*Figura 10. CPE en solución acuosa (agua milli-Q) con metal pesado (Cd, Cu o Zn).*

#### **IV.7 Aplicación de hidrogeles en sistemas biológicos**

Se desarrollaron bioensayos en cultivos hidropónicos para evaluar el efecto de los metales (Cu, Zn y Cd) en el desarrollo de la lechuga en presencia de polímeros hidrosolubles (hidrogeles). A continuación, se presenta el procedimiento desde la germinación, trasplante al sistema hidropónico y aplicación de tratamientos con hidrogeles.

##### **IV.7.1 Desarrollo de bioensayos en hidroponía**

Se desarrollaron bioensayos en cultivos hidropónicos para evaluar el efecto de los metales (Cu, Zn y Cd) en el desarrollo de la lechuga en presencia de polímeros hidrosolubles (hidrogeles).

*Germinación:* La germinación de las semillas de lechuga se realizó de acuerdo con las especificaciones del proveedor, a una temperatura controlada de 26 °C en una cámara de cultivo para crecimiento de plantas FAITHFUL FPG250, Durante 4 semanas, con una humedad relativa entre el 70 y 80 %, la lechuga alcanza un estado de crecimiento adecuado para evaluar cambios significativos en su desarrollo y calidad, con un periodo de luz continua de 16 h. Se germinaron un total de 150 semillas, distribuidas en 50 macetas de plástico ligero (profundidad x ancho x ancho base 7 x 5.5 x 5 cm), en sustrato de peat moss (turba) y perlita (roca de silicato) en una proporción 70/30 (Figura 11), con riego cada dos días con solución nutritiva (Tabla 5). La Figura 11 muestra la lechuga a los 5 y 12 días de después de su germinación. A la cuarta semana después de la germinación la lechuga suele estar en una etapa de crecimiento suficiente para observar cambios significativos en su desarrollo y calidad.



**Figura 11.** Plántulas de lechuga orejona cultivadas en macetas con sustrato de peat moss y perlita. a) 5 días después de la siembra b y c) 10 días después de la siembra.

Trasplante:

Después de las 4 semanas, se realizó el trasplante de las plantas de lechuga a un sistema hidropónico, se mantuvo una temperatura promedio en el invernadero de 25 °C. Esta temperatura se encuentra dentro del rango óptimo para el desarrollo de la lechuga, lo cual favorece su crecimiento y promueve una absorción eficiente de nutrientes en el sistema hidropónico. Las plántulas presentaban entre 4 y 6 hojas desarrolladas con un color verde claro a verde oscuro, con una textura suave y tierna, alcanzando un tamaño de 6 a 10 cm de altura. Se colocaron individualmente en macetas (medidas especificadas con anterioridad) en sustrato de peat moss y perlita bajo las mismas proporciones antes mencionadas, como soporte. Estas 6 macetas se colocaron (cada una con una plántula de 4 semanas de germinación) en placas de Styrofoam (o espuma de poliestireno) (como soporte) con 1.5 cm de espesor en contenedores de polipropileno con capacidad de 4 L (Figura 12). El experimento se adaptó para incluir un sistema de aireación por burbujeo, en el cual se inyectó aire a través de las soluciones cada 20 min. durante cada hora de exposición, conectados a través de pequeños difusores de plástico ubicados en el fondo de cada contenedor para proporcionar aireación a las raíces, Bastidas *et al* (2022). Este proceso se llevó a cabo de manera continua durante un período de 4 semanas. Durante este tiempo, las muestras fueron expuestas a diferentes tratamientos, se utilizó una solución nutritiva, preparada en agua bidestilada (Agua MilliQ) sin potasio en los tratamientos con

polímeros, dado que los polímeros empleados están diseñados para liberar potasio de forma controlada, indicada en la Tabla 4, para evaluar sus efectos. Se realizó un ajuste en la solución nutritiva para compensar la falta de nitrato debido a la eliminación del nitrato de potasio, incrementando la cantidad de nitrato de calcio en la formulación original. Esto permitió mantener niveles adecuados de nitrato en la solución, asegurando que, aunque no se aportara potasio en la solución nutritiva, las plantas recibieran una cantidad suficiente de nitrato para su desarrollo. Para los tratamientos control sin polímeros, se utilizó una solución nutritiva completa que incluía potasio, preparada con agua destilada de la caldera del CIQA (Tabla 5).

Además, se realizó un análisis de la concentración de potasio en el agua bidestilada y en el agua de la caldera para evaluar su contenido inicial y asegurar condiciones consistentes en los tratamientos (A6). Durante la preparación de la solución nutritiva, el pH se mantuvo dentro del rango óptimo de 6.5, por lo que no fue necesario ajustarlo. Sin embargo, de haber sido necesario, se habría utilizado ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ) para disminuir el pH o hidróxido de sodio ( $NaOH$ ) para aumentarlo.

El pH de la solución se determinó utilizando un equipo Combo de Hanna Instruments que mide pH, conductividad y temperatura.

**Tabla 4.** Concentraciones de macronutrientes, pH y conductividad eléctrica (CE) de una solución sin potasio para cultivos hidropónicos de lechuga.

Fuente de macronutrientes	Solución nutritiva ( $mgL^{-1}$ )
Nitrato de Calcio ( $Ca(NO_3)_2$ )	550
Fosfato Monoamónico MAP ( $NH_4H_2PO_4$ )	100
Sulfato de Magnesio ( $MgSO_4$ )	150
pH = 6.5	
C.E. = 1.7 dS/cm **	

**Tabla 5.** Concentraciones de macronutrientes, pH y conductividad eléctrica (CE) de una solución básica para cultivos hidropónicos de lechuga. \* Sandoya et al (2021) \*\* Lara et al (2023)

Fuente de macronutrientes	Solución nutritiva ( $mgL^{-1}$ )
Nitrato de Calcio ( $Ca(NO_3)_2$ )	450
Nitrato de Potasio ( $KNO_3$ )	450
Fosfato Monoamónico MAP ( $NH_4H_2PO_4$ )	100
Sulfato de Magnesio ( $MgSO_4$ )	150
pH = 6.5 *	

---

C.E. = 1.5 dS/cm \* \*

---

pH = potencial de Hidrógeno  
C.E.= conductividad eléctrica  
dS = deciSiemens  
cm = centímetros



**Figura 12.** *Trasplante de plántulas de lechuga orejona (*Lactuca sativa L.*) a un sistema hidropónico (sistema flotante o de balsa).*

*Aplicación de hidrogeles:* Se aplicaron 20 g de hidrogel por tratamiento. La cantidad de hidrogel (20 g) fue distribuida en 10 bolsas permeables de polipropileno de 5\*5 cm (2 g de hidrogel en cada bolsa). El uso de hidrogeles en bolsas fue con el objetivo de recuperarlos posteriormente.

*Aplicación de metales pesados:* En los 4 tratamientos con metales pesados se utilizó una concentración de cadmio ( $0.4 \text{ mgL}^{-1}$ ), cobre ( $6.0 \text{ mgL}^{-1}$ ) y zinc ( $20 \text{ mgL}^{-1}$ ). Las concentraciones para este estudio se seleccionaron con el objetivo

de analizar el efecto de los hidrogeles en un escenario donde el agua residual, que cumple con las regulaciones de descarga, es reutilizada en un sistema hidropónico. Esta medida es particularmente relevante ante la escasez de agua. En este contexto, se consideraron los límites permisibles de contaminantes establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021 para ríos, arroyos y drenes.

#### **IV.7.2 Diseño Descriptivo: Evaluación del impacto de diferentes concentraciones de entrecruzante en el copolímero PAM-*r*-PAMPS-K sobre el crecimiento de plantas de lechuga en un sistema hidropónico para la adsorción de metales pesados.**

En este estudio, se empleó un diseño descriptivo-exploratorio (Tabla 6) estructurado para evaluar la capacidad de los copolímeros PAM-*r*-PAMPS-K, en dos diferentes concentraciones de entrecruzante (CPE3 y CPE4), como adsorbentes de metales pesados en un sistema hidropónico de cultivo de lechuga.

Los tratamientos consideraron la adición de diferentes metales pesados (Zn, Cd, Cu) de forma individual y en combinación (TM) para evaluar la capacidad de adsorción de los polímeros. También se incluyó la liberación controlada de potasio (K) en la solución nutritiva, dado su función fundamental como macronutriente esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas de lechuga. La liberación de potasio y la adsorción de metales por los polímeros fueron estudiadas en conjunto para observar el efecto de ambas funciones en el sistema hidropónico.

Dado el carácter exploratorio del estudio, la metodología no incluyó un diseño experimental formal con replicaciones estadísticamente estructuradas. En cambio, se optó por un diseño descriptivo que permitiera una primera aproximación al comportamiento de los polímeros en la adsorción de metales y liberación de potasio, midiendo el impacto de estos factores en la materia seca de las plantas

*Descripción del Diseño:* SB (Sistema Biológico) representa el sistema biológico en el que se llevaron a cabo los tratamientos, considerando 6 unidades experimentales por tratamiento. Se evaluaron tres metales pesados de manera individual y de manera conjunta: zinc (Zn), cadmio (Cd) y cobre (Cu) en las soluciones nutritivas hidropónicas, adicionalmente se evaluó la presencia simultánea de los tres metales (Zn + Cd + Cu=TM) para observar los efectos combinados. CPE3 y CPE4 son los polímeros con diferente grado de entrecruzamiento (15 y 25 wt.%) aplicados en el sistema hidropónico para evaluar su capacidad de adsorber los metales pesados presentes en el entorno radicular de las plantas de lechuga y al mismo tiempo estudiar la liberación de un macronutriente (potasio) incluido en su estructura, esto dado a su desempeño superior en la retención de agua a altas temperaturas.

*Distribución de los Tratamientos:* Se tienen múltiples combinaciones de metales en los diferentes tratamientos SB1 a SB15. Los tratamientos SB4 y SB12, por ejemplo, incluyen la evaluación de todos los metales (TM) junto con la aplicación de los polímeros CPE3 y CPE4, lo cual permite una

comparación directa de la eficacia entre los dos polímeros. Los tratamientos SB1, SB2, y SB3, entre otros, permiten evaluar el efecto específico de un solo metal (Zn en SB1, Cd en SB2, Cu en SB3) junto con uno de los polímeros, para identificar diferencias en la adsorción específica de cada metal por parte de CPE3 y CPE4. Los tratamientos SB13 y SB14 son un control que utiliza el polímero CPE3 o CPE4 en un sistema hidropónico sin la presencia de metales pesados. El objetivo es observar si el polímero tiene algún efecto sobre las plantas de lechuga en ausencia de metales y establecer una línea base para comparar con los tratamientos donde sí se aplican metales pesados. En el tratamiento SB15, no se utiliza ningún polímero (ni CPE3 ni CPE4). Este tratamiento es un control absoluto donde no se aplican metales pesados ni polímeros. El objetivo es establecer una condición base en la que las plantas crecen en un ambiente hidropónico sin contaminantes ni aditivos, permitiendo comparar el efecto de los polímeros y de los metales pesados en otros tratamientos.

**Tabla 6.** *Desglose de los tratamientos con los CPE3 y CPE4 en plantas de lechuga en sistema hidropónico.*

Tratamiento	Metales				Polímero	
	Zn	Cd	Cu	TM	CPE3	CPE4
SB1	✓	-	-	-	✓	-
SB2	-	✓	-	-	✓	-
SB3	-	-	✓	-	✓	-
SB4	-	-	-	✓	✓	-
SB5	✓	-	-	-	-	✓
SB6	-	✓	-	-	-	✓
SB7	-	-	✓	-	-	✓
SB8	-	-	-	✓	-	✓
SB9	✓	-	-	-	-	-
SB10	-	✓	-	-	-	-
SB11	-	-	✓	-	-	-
SB12	-	-	-	✓	-	-
SB13	-	-	-	-	✓	-
SB14	-	-	-	-	-	✓
SB15	-	-	-	-	-	-

SB: Sistema biológico, Zn: Zinc, Cd: Cadmio, Cu: Cobre, TM: todos los metales (Cd, Cu y Zn)

### IV.7.3 Variables evaluadas

Las variables evaluadas son la concentración de los diferentes metales pesados en la solución nutritiva al inicio y final del tratamiento, la concentración de los metales pesados y potasio en hojas y raíces

de lechuga al final del tratamiento, así como la biomasa de lechuga al final del tratamiento. La duración de la experimentación es de 4 semanas contadas a partir de la aplicación de los tratamientos.

#### ***IV. 7.3.1 Determinación de biomasa en *Lactuca sativa* L. (Lechuga)***

La biomasa de *Lactuca sativa* L. (lechuga) se midió tras 4 semanas de tratamiento para evaluar el impacto de metales pesados en presencia de hidrogeles, comparándola con plantas control sin tratamiento.

La metodología consistió en la recolección de las 6 plantas de *Lactuca sativa* L. de cada tratamiento previamente descrito, etiquetándolas para mantener un registro claro. Se cosecharon raíces y hojas, y se pesaron inmediatamente para registrar la biomasa fresca utilizando una balanza de precisión. Las muestras fueron colocadas en bandejas de aluminio, etiquetadas y secadas en un horno a 60-70°C durante 48-72 h, hasta alcanzar un peso constante. Posteriormente, las muestras secas se enfriaron en un desecador y se volvieron a pesar para determinar la biomasa seca finalmente expresada en gramos.

#### ***IV.7.3.2 Concentración de metales pesados en *Lactuca sativa* L.***

El análisis de metales pesados en *Lactuca sativa* L. (lechuga) es fundamental para evaluar la posible acumulación de estos contaminantes (cadmio, cobre y zinc) en las plantas durante las 4 semanas de tratamiento. Por otro lado, la medición de potasio en *Lactuca sativa* L. permite comprobar la liberación de este macronutriente desde los polímeros que fueron adsorbidos por la planta.

#### **Metodología de cuantificación de Cd, Cu, Zn y K en tejidos vegetales de *Lactuca sativa* L.**

La digestión ácida es un método estándar utilizado para descomponer las muestras vegetales y liberar los metales pesados en una solución que puede ser analizada mediante técnicas como la Espectroscopía de Absorción Atómica (AAS), la Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES). Para cuantificar las concentraciones de los metales pesados y potasio en las muestras de este estudio se utilizó ICP-OES. A continuación, se describe en detalle el proceso de digestión ácida para el análisis de metales pesados y potasio en lechuga.

*Preparación de la Muestra:* Se recolectan muestras representativas de las plantas de lechuga (hojas y raíz) y se registra su peso en fresco. Las muestras se lavan para eliminar cualquier contaminación

superficial y se dejan secar en estufa a 60-70 °C durante 48-72h, finalmente se registra el peso seco. Se tritura la muestra para obtener una homogeneización de la muestra previa a su análisis en donde se requiere de 0.5 g de muestra.

*Digestión Ácida:* La muestra preparada se somete a un proceso de digestión ácida. Este paso implica el uso de ácidos fuertes (5 ml de HCl al 36.5 % pureza y 5 ml de HNO<sub>3</sub> al 69 % de pureza) para descomponer la materia orgánica y liberar los metales presentes.

*Calentamiento:* La mezcla ácida y la muestra se calientan a 115 °C durante 2 h en un bloque de digestión. Este proceso acelera la descomposición de la muestra.

*Evaporación y Dilución:* Después de la digestión, se evapora el ácido residual para concentrar la solución. La solución resultante se diluye en agua destilada a un volumen 25 ml en un matraz aforado.

#### **IV.7.5 Determinación de potasio liberado por hidrogeles**

Basado en la estructura química de los copolímeros entrecruzados (hidrogeles), se puede calcular la cantidad de potasio contenido en cada material polimérico. Tomando en cuenta los valores (pesos) de cada monómero utilizado para preparar los CPE3 y CPE4 y la completa conversión de los monómeros hacia la formación de los hidrogeles, se considera la totalidad de cada reactivo. Primero, se calcula el porcentaje de AMPS-K dentro del hidrogel (56.7 y 52 % para CPE3 y CPE4). Posteriormente, se determina el porcentaje de potasio considerando los pesos moleculares del AMPS-K y el elemento K (= 16.5 % de K en AMPS-K). La cantidad de polímero en cada contenedor de 4 litros fue de 20 gramos.

$$\text{Cantidad de K en hidrogel} = (\text{cantidad de AMPS} - \text{K en hidrogel}) \left( \% \frac{K}{100} \right)$$

Por otra parte, para evaluar la liberación de potasio de los hidrogeles CPE3 y CPE4, se preparó una muestra de 100 ml de agua bidestilada (MilliQ) sin potasio inicial, a la cual se añadió 0.5 g de hidrogel (CPE3 o CPE4, según el tratamiento). La muestra se dejó en agitación durante 72 horas para permitir la liberación de potasio en el medio acuoso. Al final de este periodo, se dejó en reposo durante 1h. Se realizó un único análisis de la concentración de potasio mediante espectrometría de masas por plasma acoplado inductivamente (ICP). Este procedimiento tuvo como objetivo verificar la liberación de potasio sin réplica, para obtener una primera aproximación de la capacidad del hidrogel en condiciones controladas.

## **V. HERRAMIENTAS DE SOFTWARE**

Para el desarrollo de esta tesis, se utilizó el software Origin 9.0, reconocido por su capacidad para realizar análisis de datos y generar representaciones gráficas de alta calidad. Origin 9.0 facilitó el procesamiento de los datos de FT-IR y SEC, permitiendo la creación de gráficos que ilustran de manera clara las tendencias observadas.

Por otro lado, el procesamiento y análisis de los datos de (RMN) se llevó a cabo con Topspin 4.2.0. Este software fue crucial para el manejo de los espectros de RMN, permitiendo una interpretación detallada de las señales y una visualización precisa de los resultados. La combinación de Origin 9.0 y Topspin 4.2.0 permitió realizar un análisis completo y detallado de los datos experimentales, asegurando una interpretación clara y fundamentada de los resultados obtenidos.

## **VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Durante el desarrollo del experimento, se sintetizaron primero polímeros hidrosolubles lineales utilizando monómeros derivados de la acrilamida, y posteriormente se prepararon polímeros hidrosolubles entrecruzados (geles) mediante la técnica de polimerización RAFT. La caracterización de estos polímeros se realizó mediante espectroscopía infrarroja (IR), resonancia magnética nuclear (RMN), y cromatografía de exclusión de tamaño (SEC). Se recopilaron datos sobre el peso fresco y seco de las raíces y hojas, y se midieron las concentraciones de metales pesados (cadmio, zinc y cobre) en los tejidos vegetales. Además, se analizó la capacidad de los polímeros para adsorber estos metales, cuantificando la cantidad retenida tanto en la solución nutritiva como en los polímeros. Finalmente, se cuantificó la liberación de potasio por parte de los polímeros hacia la solución nutritiva, tanto al inicio como al término del experimento, así como su contenido en raíces y hojas.

### **VI.1 Síntesis y caracterización de (co)polímeros**

Este estudio, se logró la síntesis (co)polímeros hidrosolubles mediante la técnica de polimerización RAFT, la cual permitió obtener polímeros con estructura controlada. Esta técnica facilitó la determinación precisa del peso molecular y la distribución de pesos moleculares, parámetros

fundamentales en la caracterización de los polímeros. Se obtuvieron tanto polímeros en bloque como polímeros aleatorios, proporcionando una amplia versatilidad en las propiedades de los materiales sintetizados. Los polímeros sintetizados demostraron ser efectivos en la retención de agua, la remoción de cadmio, cobre y zinc y liberación de potasio, en condiciones hidropónicas. Los hidrogeles fueron preparados con éxito utilizando condiciones similares a las empleadas en la síntesis de los (co)polímeros mediante la polimerización RAFT, lo que permitió mantener el control en la estructura y propiedades fisicoquímicas de materiales obtenidos, asegurando el rendimiento previsto en las aplicaciones experimentales. Como se mencionó en el último párrafo de la sección de antecedentes, este trabajo de investigación se centra en la síntesis de (co)polímeros hidrosolubles, especialmente hidrogeles, que sean capaces de retener agua, remover metales pesados y liberar nutrientes cuando se utilicen como sustrato en sistemas vegetales. Por esta razón, se seleccionaron monómeros con el propósito de sintetizar los materiales poliméricos deseados. Es bien sabido que determinar el peso molecular (un parámetro importante en polímeros) de los hidrogeles presenta dificultades. En este contexto, se propuso la síntesis de homo y (co)polímeros lineales, tanto en bloque como aleatorios, mediante la técnica de polimerización RAFT, lo que permite calcular el peso molecular y la estructura química de los materiales poliméricos. Posteriormente, se prepararon los hidrogeles utilizando condiciones similares a las empleadas en la síntesis de los (co)polímeros *vía* RAFT.

#### **VI.1.1 Síntesis de homo y (co)polímeros hidrosolubles *vía* polimerización RAFT**

Se llevó a cabo la síntesis de un homopolímero de poli(acrilamida) (PAM) utilizando polimerización RAFT en presencia de dimetil ácido-tritiocarbonato (DMAT) como agente de transferencia, obteniendo el macroRAFT. Posteriormente se sintetizó un copolímero en bloque al extender las cadenas del macroRAFT mediante la polimerización de AMPS-K bajo las mismas condiciones. Adicionalmente, se preparó un copolímero aleatorio PAM-*co*-PAMPS-k mediante polimerización RAFT y, en paralelo, se sintetizó un copolímero aleatorio a través de polimerización radicalica convencional, sin el uso de un agente de transferencia. Los resultados obtenidos, como las condiciones de síntesis y los parámetros fisicoquímicos medidos, se presentan en la tabla 7, donde se destacan las diferencias en la distribución de peso molecular y la estructura química entre los distintos polímeros sintetizados.

### VI.1.2 Síntesis de copolímeros entrecruzados (CPEs)

Los resultados se presentan en la Tabla 7. El peso molecular teórico (macroRAFT) se calculó para 151,075 g/mol, y el  $M_{nSEC}$  (masa molar promedio numérica, determinado a través de la técnica SEC) fue de 71,410 g/mol. Para los copolímeros en bloque y aleatorios obtenidos *vía* polimerización RAFT, el  $M_{tTEO}$  se calculó para 200,000 g/mol, y el  $M_{nSEC}$  fue de 72,180 y 993,380 g/mol, respectivamente. Por su parte, el copolímero aleatorio obtenido *vía* FRP (polimerización por radicales libre, por sus siglas en inglés) mostró un  $M_{nSEC}$  de 1 449,000 g/mol, valor que difiere completamente de los copolímeros (bloque y aleatorio) obtenidos *vía* polimerización, lo que indica el efecto del agente de transferencia en el control de la propagación y el tamaño de las cadenas poliméricas.

A partir de los resultados de RMN de protón, se pudo calcular la composición molar de los materiales poliméricos. El macroRAFT mostró un 100% de PAM. La composición molar de PAM y PAMPS-K en los copolímeros varió entre 75/25 y 85/15. Cabe mencionar que la inserción de segmentos de PAMPS-K en el copolímero puede aportar varias funciones: la PAM puede proporcionar propiedades de retención de agua y mejorar la estructura del gel deseado, mientras que el segmento o bloque PAMPS-K puede contribuir con propiedades de solubilidad y carga negativa, útiles para aplicaciones específicas como la adsorción de iones de metales pesados y la liberación de nutrientes. Los datos obtenidos en las pruebas analíticas para la obtención de copolímeros aleatorios han sido cruciales para diseñar copolímeros entrecruzados con características específicas requeridas para esta investigación.

#### **Copolímeros Entrecruzados (CPE) con diferente grado de entrecruzamiento ( 15 y 25 wt% del MBA)**

En el caso de los 4 CPEs, la conversión fue superior al 99 %. No se pudo determinar el  $M_{nSEC}$  ni la composición molar de estos materiales. El CPE con menor grado de entrecruzamiento (5% en peso) se hinchó en la solución buffer, y al realizar el proceso de filtración usando una membrana de Nylon con un tamaño de 0.2  $\mu$ m, la solución no logró atravesar la membrana, indicando un tamaño superior al requerido para el equipo SEC. Por ello, no se realizaron los análisis de los hidrogeles con el fin de evitar posibles taponamientos en las columnas del equipo SEC.

**Tabla 7.** Propiedades y composición de homopolímeros y copolímeros de acrilamida y PAMPS-K sintetizados mediante polimerización RAFT y convencional.

Polímeros	Clave	Conversión (%) <sup>a</sup>	$M_n$ Teo (g/mol) <sup>b</sup>	$M_n$ SEC (g/mol) <sup>c</sup>	Composición [PAM]/[PAMPS] <sup>d</sup>
Homopolímero vía RAFT	PAM (Macro-RAFT)	99.9	151,075	71,410	100/0
Copolímero en bloque (vía RAFT)	PAM- <i>b</i> -PAMPS-K	99.7	200,000	72,180	83.6/16.4
Copolímero aleatorio RAFT	PAM- <i>r</i> -PAMPS-K	99.7	200,000	993,380	75.8/24.2
Copolímero aleatorio Convencional	PAM- <i>r</i> -PAMPS-K	99.8	433,018	1,449,000	86.2/13.8
Copolímero aleatorio entrecruzado	CPE-1(5 wt.%)	99.8	NA	NA	NA
Copolímero aleatorio entrecruzado	CPE-2 (10 wt.%)	99.8	NA	NA	NA
Copolímero aleatorio entrecruzado	CPE-3 (15 wt.%)	99.8	NA	NA	NA
Copolímero aleatorio entrecruzado	CPE-4 (25 wt.%)	99.8	NA	NA	NA

a) Conversión por gravimetría, b)  $M_n$ Teo = [monómero] / [CTA], c) SEC en agua, solución buffer pH 7, d) RMN usando la ecuación

$$\% \text{ PAMPS-K} = \frac{\int \text{CH}_2 \text{ PAMPS-K}}{\int \text{CH polímero}}$$

### VI.1.3. Desempeño de los mecanismos de reacción para la síntesis de homopolímeros y copolímeros mediante polimerización RAFT

El gráfico presentado en la Figura 13 proporciona una visualización detallada de los mecanismos de reacción involucrados en la síntesis de diferentes tipos de polímeros utilizando la técnica de polimerización RAFT (Reversible Addition-Fragmentation chain Transfer). Esta técnica es conocida por su capacidad para controlar el peso molecular y la arquitectura de los polímeros sintetizados. A continuación, se describe cada subfigura en detalle 13a) Ilustra la síntesis de un homopolímero de poliacrilamida (PAM) mediante polimerización RAFT. En este proceso, la acrilamida reacciona con

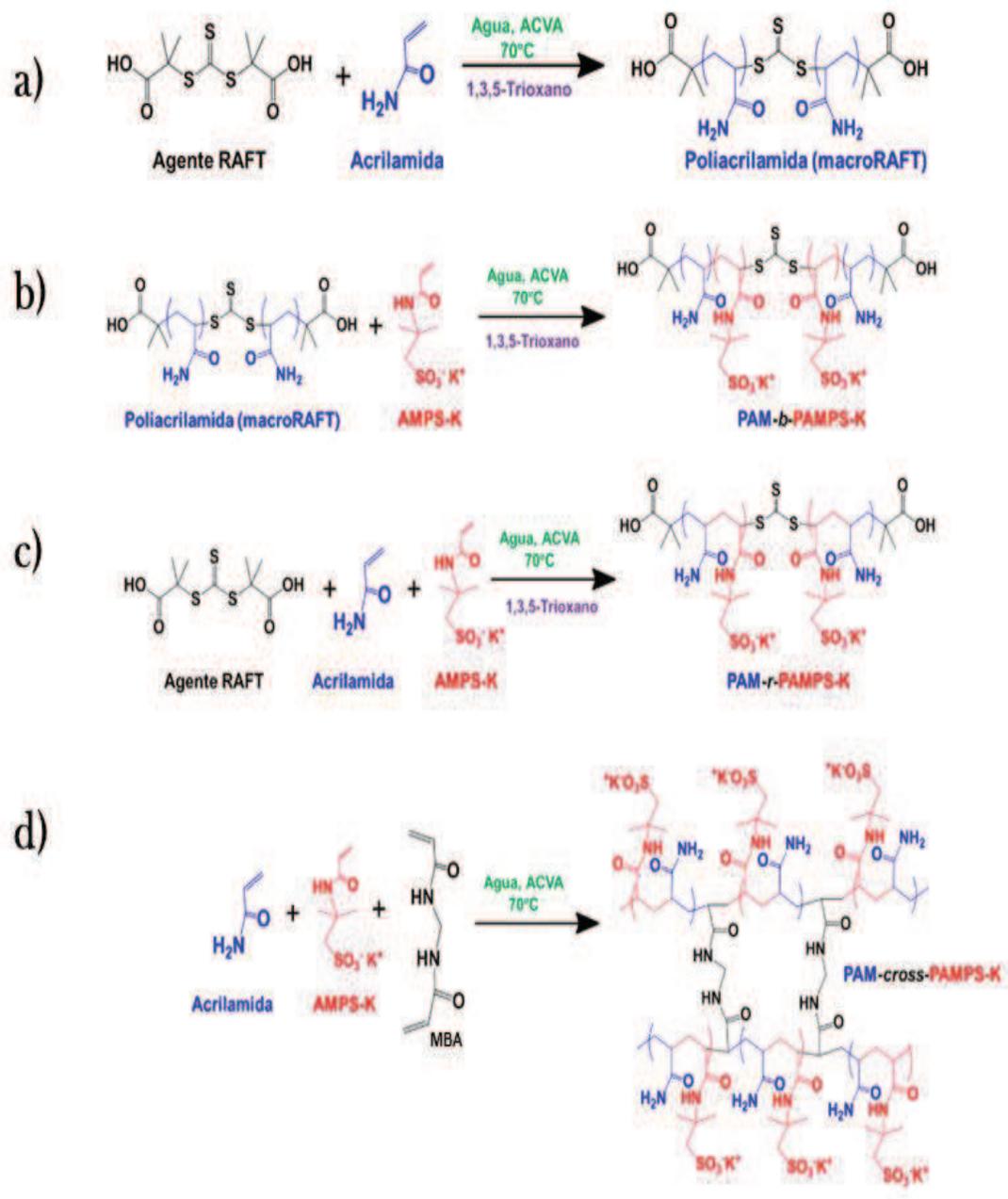
un agente RAFT específico en presencia de ACVA como iniciador térmico y 1,3,5-trioxano como referencia interna, en un medio acuoso a 70 °C. El resultado es la formación de poliacrilamida (macroRAFT), un homopolímero con un peso molecular controlado y una estructura bien definida.

13b) Muestra la extensión del homopolímero sintetizado en la parte a) para formar un copolímero en bloque (PAM-*b*-PAMPS-K). En este paso, el macroRAFT de poliacrilamida actúa como una base para la polimerización de AMPS-K, otro monómero con grupos sulfonato, en condiciones similares a las anteriores. Este proceso resulta en un copolímero en bloque con segmentos distintos de PAM y PAMPS-K, lo que permite combinar las propiedades de ambos monómeros en un solo material.

12c) Representa la síntesis de un copolímero aleatorio (PAM-*r*-PAMPS-K) utilizando acrilamida y AMPS-K como monómeros, junto con el mismo agente RAFT y condiciones de reacción (agua, ACVA a 70 °C). A diferencia de los copolímeros en bloque, en los copolímeros aleatorios, los monómeros se distribuyen aleatoriamente a lo largo de la cadena polimérica, lo que resulta en materiales con propiedades intermedias entre las de los homopolímeros de los monómeros individuales.

13d) Detalla la síntesis de copolímeros entrecruzados (PAM-*r*-PAMPS-K) mediante la incorporación de un agente entrecruzante, bisacrilamida (MBA), además de los monómeros acrilamida y AMPS-K lo cual da lugar a una red tridimensional entrecruzada que resulta en un hidrogel. Estos materiales tienen la capacidad de hincharse en agua y presentan propiedades mecánicas y de retención de agua mejoradas.

Estas representaciones visuales detallan cómo las diferentes combinaciones de monómeros y técnicas de polimerización pueden ser utilizadas para diseñar polímeros con estructuras y propiedades específicas.

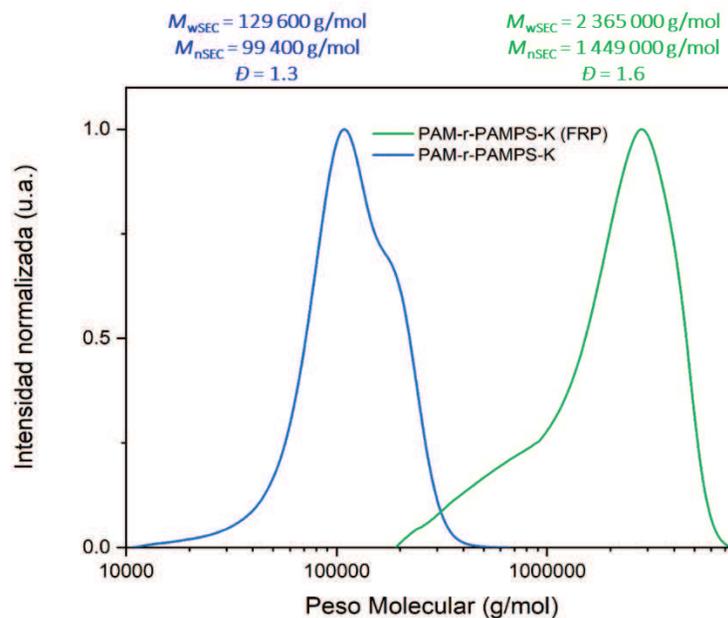


**Figura 13.** Mecanismos generales de reacción. a) Homopolímero PAM vía RAFT, b) Copolímero en Bloque PAM-b-PAMPS-K, c) Copolímero Aleatorio PAM-r-PAMPS-K y d) Copolímeros Aleatorios Entrecruzados (CPE).

#### VI.1.4 Cromatografía por exclusión de tamaño (SEC)

La Figura 14 muestra la distribución del peso molecular de dos copolímeros aleatorios PAM-r-PAMPS-K analizados mediante SEC. Los polímeros fueron sintetizados utilizando dos métodos

diferentes: polimerización radicalica convencional o polimerización por radicales libres (FRP) y polimerización RAFT. Con respecto a la distribución del peso molecular: La Curva en color azul (PAM-*r*-PAMPS-K *vía* RAFT), representa el copolímero sintetizado mediante la técnica RAFT. El valor de la distribución ( $\bar{D} = 1.3$ ) es relativamente estrecha, evidenciando que hay poca dispersión en los pesos moleculares, sugiriendo que las cadenas de polímero son más uniformes en tamaño, lo que indica un control más preciso sobre el peso molecular. La polimerización RAFT es conocida por producir polímeros con una distribución más uniforme del peso molecular, lo que se refleja en este perfil de elución. El peso molecular promedio es más bajo en comparación con el copolímero sintetizado por FRP. Por otra parte, la curva en color verde (PAM-*r*-PAMPS-K *vía* FRP), muestra la distribución del peso molecular del copolímero sintetizado mediante FRP. En este caso, la distribución es más amplia, lo que indica una mayor dispersión en los pesos moleculares de las cadenas poliméricas. El peso molecular promedio es significativamente mayor en comparación con el copolímero RAFT. Sin embargo, la mayor dispersión sugiere que este método genera diferentes poblaciones de polímeros con una variedad de tamaños moleculares, lo cual es común en la polimerización radicalica no controlada.



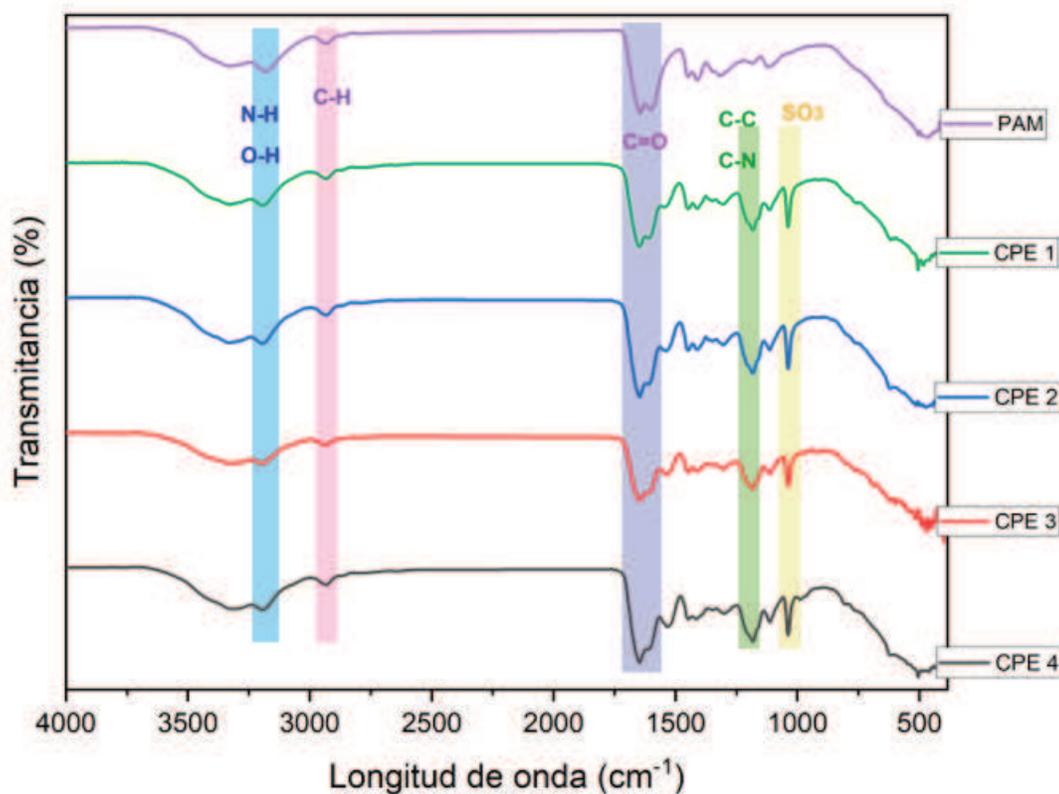
**Figura 14.** Cromatografía por exclusión de tamaño (SEC) de PAM-*r*-PAMPS-K.

Otros aspectos muy importantes de la Figura 14 son los valores de los pesos moleculares promedios en número ( $M_{nSEC}$ ) y en peso de los copolímeros aleatorios preparados *vía* polimerización RAFT y

FRP desarrollados bajo las mismas condiciones de reacciones usando valores similares de reactivos. En el caso del copolímero obtenido mediante RAFT, el  $M_{nSEC} = 99,400$  g/mol es muy cercano al peso teórico ( $M_{nTeo} = 100,000$  g/mol). En contraste, el copolímero aleatorio obtenido *vía* FRP exhibe un  $M_{nSEC} = 1\,449,000$  g/mol y este valor es 14 veces mayor que el copolímero preparado por la técnica de polimerización controlada RAFT. Adicional a los datos de la distribución de los pesos moleculares ( $\mathcal{D}$ ), la discrepancia de los  $M_{nSEC}$  de los copolímeros aleatorios indica que la técnica RAFT permite controlar el proceso de polimerización mientras que la FRP no ejerce ningún control sobre el crecimiento de las cadenas poliméricas. El análisis previamente realizado sobre los copolímeros aleatorios sintetizados mediante FRP proporcionó información sobre la distribución de pesos moleculares y el peso molecular promedio, lo cual es esencial para la síntesis de los copolímeros entrecruzados (uno de los objetivos de esta investigación)

#### VI.1.5 Espectroscopia Infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR) ATR

Para evidenciar la presencia de grupos funcionales de los monómeros dentro de la estructura de los (co)polímeros (lineales e hidrogeles), los materiales poliméricos sintetizados fueron caracterizados mediante la técnica de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR). Las mediciones fueron llevadas a cabo en modo ATR con soporte de Diamante a temperatura ambiente. En la Figura 15 se presentan los espectros infrarrojos del macroRAFT y los hidrogeles derivados de la copolimerización de la AM, AMPS-K, MBA en presencia ACVA. En la región de 3.200 a 3.400  $\text{cm}^{-1}$  se observa una señal correspondiente a los estiramientos de los enlaces N-H y O-H, característicos de la estructura polimérica. En 2.940  $\text{cm}^{-1}$ , se detecta una vibración de estiramiento correspondiente a los enlaces C-H de los grupos metilo, metileno y metino presentes en la cadena polimérica. La señal observada en la región entre 1.650 y 1.670  $\text{cm}^{-1}$  puede ser atribuida a las bandas de absorción del grupo carbonilo (C=O), indicando la presencia de enlaces carbonílicos en la estructura de los polímeros (macroRAFT e hidrogeles). El Pico en 1.160  $\text{cm}^{-1}$  está relacionado con los enlaces C-N y C-C, confirmando la estructura polimérica de la red. El Pico en 1.090  $\text{cm}^{-1}$  confirma la presencia de los grupos funcionales sulfonato de potasio del AMPS-K al interior de la estructura de los hidrogeles. Este grupo funcional no está presente en el macroRAFT, indicando la incorporación de AMPS-K en la estructura de los hidrogeles sintetizados.



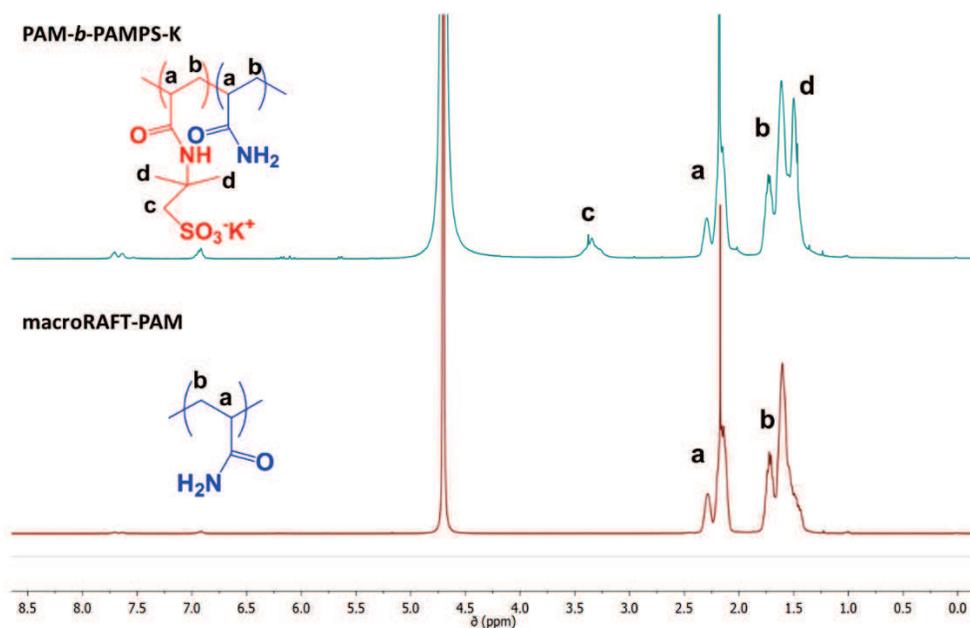
*Figura 15. Espectro de ATR FT-IR de copolímeros: PAM, CPE1, CPE2, CPE3 Y CPE4*

## VI.1.6 Resonancia Magnética nuclear (RMN <sup>1</sup>H)

### VI.1.6.1 Caracterización de macroRAFT y PAM-*b*-PAMPS-K

Para confirmar su estructura química, los polímeros lineales (RAFT y radicales libres) fueron caracterizados por resonancia magnética nuclear de protón (RMN <sup>1</sup>H). En la Figura 16 se presenta los espectros de dos polímeros: macroRAFT-PAM y el copolímero en bloque PAM-*b*-PAMPS-K obtenidos mediante la polimerización RAFT. El espectro de color rojo vino corresponde al macroRAFT-PAM. En este espectro se observa dos pequeños desplazamientos químicos ( $\delta$ ) en 7.6 y 6.9 ppm que corresponden a los protones del grupo amida (NH<sub>2</sub>) y la baja intensidad de estos  $\delta$  puede ser atribuida a su interacción con moléculas de agua las cuales conducen a un proceso de solvatación y disminución de la intensidad de los desplazamientos químicos. A un  $\delta = 4.7$  ppm se observa una señal muy grande que corresponde a los protones del agua (deuterada). Por otra parte, el  $\delta$  de los metinos (a) y metilenos (b) de la cadena principal del polímero fue detectado en 2.2 y 1.

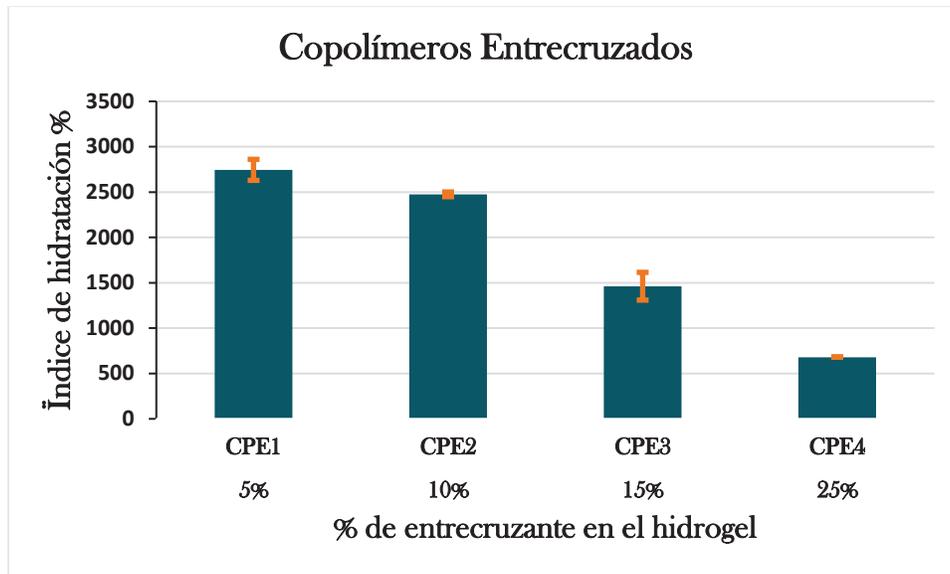
6 ppm, respectivamente. El espectro de PAM-*b*-PAMPS-K en color azul, las señales a y b corresponden a las mismas unidades estructurales que se observaron en el macroRAFT-PAM. En  $\delta = 1.4$  ppm se detectan los protones metilos ( $\text{CH}_3$ ) del AMPS. Los protones del grupo metileno adyacente al carbono cuaternario del AMPS-K fue observado a un  $\delta$  entre 3.1 y 3.3 ppm. La presencia de estas señales confirma la formación del copolímero en bloque, donde ambos monómeros (AM y AMPS-K) están presentes. Con respecto al espectro de macroRAFT-PAM y el espectro de PAM-*b*-PAMPS-K, lo fundamental es la presencia de las señales adicionales (c y d) en este último, lo que confirma la incorporación de AMPS-K en la estructura polimérica. La presencia y correcta asignación de los desplazamientos químicos confirman la formación del macroRAFT-PAM y PAM-*b*-PAMPS-K. El espectro RMN  $^1\text{H}$  no muestra señales adicionales que podrían indicar la presencia de impurezas o productos secundarios. Adicionalmente, los valores de la integración de los grupos funcionales c y d fueron utilizados para determinar la relación molar de los monómeros utilizados en la preparación de los copolímeros (en bloque y aleatorio).



*Figura 16. Espectro RMN-1H (agua deuterada) de poliacrilamida (PAM).*

### VI.1.7 Índice de hidratación de hidrogel PAM-*r*-PAMPS-K

En la Figura 17 se muestra el resultado del análisis del índice de hidratación (%) de los copolímeros entrecruzados (CPE1, CPE2, CPE3 y CPE4) con diferentes porcentajes de entrecruzante en presencia de agua Milli-Q y los resultados observados son los siguientes: Los CPE1, CPE2, CPE3 y CPE4 tienen un índice de hidratación con un valor cerca de 2745, 2475, 1462, y 680 wt. %, respectivamente. De este resultado, podemos observar una tendencia (muy definida) decreciente en el índice de hidratación a medida que aumenta el contenido de entrecruzante en el hidrogel. Por ejemplo, los CPE1 y CPE2 que tienen un menor contenido de entrecruzante (5 y 10 wt. % de MBA) mostraron un índice de hidratación más alto (2,745 y 2,475 %). Por otra parte, los CPE3 y CPE4, que poseen un mayor contenido de entrecruzante (15 y 25 wt. % de MBA) exhibieron un menor índice de hidratación (1462 y 680 %). Este comportamiento se debe a que el entrecruzamiento crea enlaces adicionales entre las cadenas poliméricas, restringiendo la capacidad del hidrogel para absorber agua y expandirse (Ortiz *et al.*, 2021). Por lo tanto, los hidrogeles con mayor porcentaje de entrecruzante, como CPE3 y CPE4 tienden a tener un índice de hidratación más bajos, con respecto a CPE1 Y CPE2, debido a la rigidez de la estructura del polímero. Los valores preliminares obtenidos como la capacidad de retención de agua, eficiencia en la adsorción de Cd, Cu y Zn y liberación de potasio obtenidos de cada uno de los hidrogeles CPEs son importantes y significativos para la toma de decisiones en particular para el diseño y preparación de los tratamientos para los sistemas biológicos.

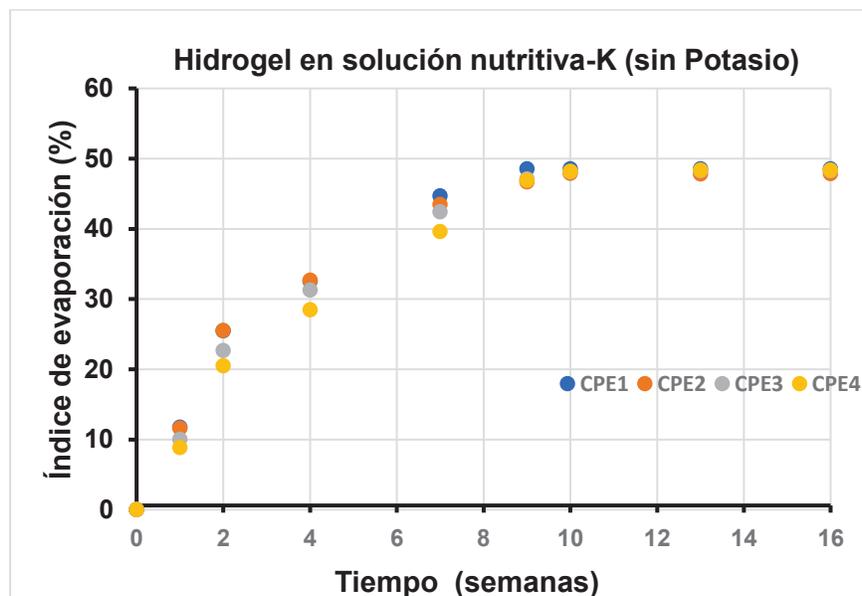


*Figura 17. Índice de hidratación de los diferentes hidrogeles CPE1, CPE2, CPE3 y CPE4.*

#### VI.1.8 Índice de evaporación de agua en hidrogeles

Se determinó el porcentaje de pérdida de agua de evaporación (%) de los hidrogeles (CPE1, CPE2, CPE3 y CPE4) en una solución nutritiva sin potasio, simulando las mismas condiciones utilizadas en los tratamientos con hidrogeles, pero sin la presencia de potasio, para evaluar su comportamiento en un entorno comparable durante un período de 16 semanas (Figura 18). El experimento se llevó a cabo a temperatura constante 27 °C y presión atmosférica. Como se puede observar en la Figura 18, todas las soluciones hidrogeles con SN sin K mostraron una disminución significativa entre 8-12 % de evaporación de agua durante la primera semana. Por otra parte, entre el inicio de la semana 2 hasta la semana 10, las soluciones hidrogeles con SN sin K exhibieron una pérdida de agua (aumento del índice de evaporación) entre el 12 hasta 48 % del agua de cada solución. Finalmente, el índice de evaporación de agua de las soluciones se mantuvo constante 48 % durante las últimas semanas (10 hasta 16) de la experimentación. Cabe resaltar que la mayor diferencia en el comportamiento de los hidrogeles durante la determinación del índice evaporación de agua fue observada entre la semana 2 y semana 8. También, se realizaron análisis del índice de evaporación de agua de los hidrogeles en presencia de agua bidestilada y solución nutritiva con potasio y los resultados son presentados en los Anexos A1 y A2, respectivamente. En el caso del índice de evaporación de agua

de los hidrogeles en presencia de la SN con potasio exhibió un comportamiento similar a la SN sin K. A las primeras semanas, el índice de evaporación fue prácticamente idéntica (8 al 10 %) para los hidrogeles. Sin embargo, entre las semanas 2 y 7 se observó que los CPE1 y CPE2 presentaron una evaporación más rápida que los CPE3 y CPE4. Esta diferencia puede ser atribuida al grado de entrecruzamiento de los CPEs, es decir a menor grado de entrecruzamiento (5 y 10 wt. % de CPE1 y CPE2) el índice de evaporación de agua es mayor. Finalmente, el porcentaje de agua evaporada en los sistemas hidrogeles en agua bidestilada, es casi similar para cualquier de los hidrogeles utilizados. Este resultado indica que el grado de entrecruzamiento del hidrogel influyó en el proceso de evaporación de las moléculas de agua bajo las condiciones del experimento. Comparando los datos de la evaporación de agua en los tres sistemas, podemos observar que no existe una variación en el índice de evaporación de los hidrogeles en agua bidestilada mientras que se observa una diferencia entre las semanas 2 y 8 para los hidrogeles en presencia de SN sin o con K. Esta diferencia puede ser atribuida a los iones provenientes de las sales utilizadas en la preparación de las SNs las cuales interactúan con la matriz de los hidrogeles facilitando una mayor evaporación de agua. Se puede concluir que tanto el grado de entrecruzamiento como la presencia de iones influyeron en el índice de evaporación de agua de los hidrogeles.



**Figura 18.** Índice de evaporación de agua en CPE1, CPE2, CPE3 Y CPE4 en solución nutritiva sin potasio.

### VI.1.9 Pérdida de Agua en CPE1, CPE2, CPE3 Y CPE4.

En la Figura 19 se muestran los resultados de la capacidad de pérdida de agua de los hidrogeles (CPE1, CPE2, CPE3, y CPE4) a diferentes temperaturas (30, 40, 50 y 60°C) y tiempo de 3, 6, 12 hasta 24 h. Este experimento fue realizado considerando un trabajo reportado recientemente por Tian *et al.*, (2023) en donde reportaron condiciones experimentales similares para determinar la capacidad de retención de agua de hidrogeles HEC-g-P (AA-co-AMPS). La Figura 19a exhibe la pérdida de agua de los hidrogeles a una temperatura específica de 30 °C y diferentes tiempos de 3, 6, 12 y 24 h. Como se puede observar cada hidrogel demuestra una constante disminución de su contenido de humedad para retener agua (99 hasta 90 %) a medida que aumenta el tiempo (desde 3 hasta 24 h). En el caso de las mediciones de la retención de agua realizadas a una temperatura de 40 °C (Figura 19b), los CPE 1 y CPE2 demuestran una disminución constante y similar de su contenido de humedad para retener el agua (75 %, 24 h) dentro su estructura entrecruzada. El hidrogel CPE3 exhibe una mayor pérdida de agua que los hidrogeles de menor grado de entrecruzamientos (CPE1 y CPE2). Por su parte, el hidrogel (CPE4) muestra una pérdida gradual de agua en los tiempos de 3, 6 y 12 h. Sin embargo, la medición del análisis de retención de agua del CPE4 a 24 h indica que este material tiene una pérdida de agua (25 %) similar que los CPE 1 y CPE2. A 24 h, el hidrogel CPE4 conserva mayor cantidad (75 %) de agua en comparación con el hidrogel CPE3 (67%). Este comportamiento puede ser atribuido a la estructura altamente entrecruzada del material la cual influye en la retención del agua. La presencia de una cantidad de grupos entrecruzantes dificulta la liberación de las moléculas de agua por lo tanto se mejora su fuerza de retención de agua.

La Figura 19c presenta los resultados de los análisis de retención de agua de los hidrogeles a una temperatura de 50 °C y diferentes tiempos, 3, 6, 12 y 24 h. Como se puede observar, los hidrogeles presentan la misma pérdida de agua (9 %) en las primeras 3 horas. Entre las 3 y 6 horas, los CPE1 y CPE2 exhiben menor pérdida (13 y 14 %) que los CPE3 y CPE4 (18 y 20 %). Por otra parte, los CPE1 y CPE2 demuestran una pérdida de agua similar 22 y 45 % a un tiempo de 12 y 24 horas, respectivamente. En el caso del CPE3, se observa una pérdida de agua del 33 y 38 % a un tiempo de 12 y 24 h. Finalmente, el hidrogel CPE4 exhibe una pérdida de agua constante (25 %) a tiempos de 12 y 24 h. Este resultado indica que a mayor tiempo (24 h), el hidrogel de mayor grado de entrecruzamiento posee una mayor retención de las moléculas de agua y se requiere de mayor esfuerzo para liberar y expulsar las moléculas de agua atrapadas al interior de la estructura del

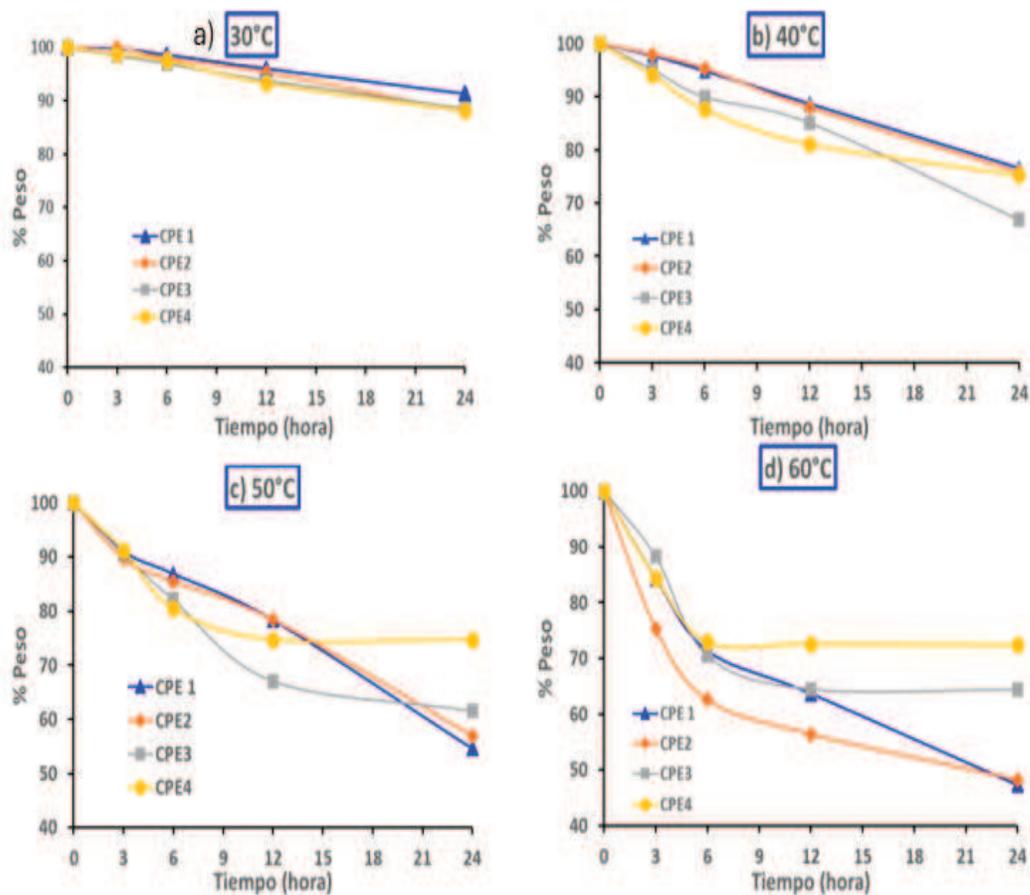
hidrogel. La Figura 19d presenta la temperatura más alta (60°C). Todos los polímeros experimentan una pérdida dramática de agua en las primeras 3 horas. Después de 24 h, CPE4 retiene más agua (alrededor del 50 % de su peso inicial), mientras que CPE1 y CPE2 retienen menos del 50 %.

CPE4 muestra consistentemente la mejor retención de agua a temperaturas más altas (50 y 60°C), lo que sugiere que este polímero tiene una red más densa o una estructura que permite una mejor retención de agua en condiciones más severas. CPE1 y CPE2 tienen un rendimiento similar, pero su capacidad de retención de agua disminuye más rápidamente a medida que la temperatura aumenta, especialmente a 50 y 60°C. Asimismo, CPE3 parece tener una retención de agua intermedia, mejor que CPE1 y CPE2 en temperaturas más altas, pero no tan eficiente como CPE4. Por otra parte, hay una disminución significativa de la capacidad de retención de agua de los hidrogeles CPE1 y CPE2 en comparación con CPE3 y CPE4, con una pérdida de peso alrededor del 50% a 60°C tras 24 horas. Aunque es natural que la evaporación de agua aumente al aportar más energía térmica, la mayor pérdida de peso en CPE1 y CPE2 sugiere, que su estructura polimérica podría verse afectada de forma importante a altas temperaturas, lo que compromete su capacidad para retener agua de manera óptima (Zhibin *et al.*, 2022). A pesar de tener una menor capacidad de hidratación en comparación con los otros hidrogeles, el hidrogel CPE4 retiene más agua a altas temperaturas y por más tiempo. Esta característica puede ser atribuida al mayor grado de entrecruzamiento de los CPE3 y CPE4 y sus redes más densas y rígidas. Aunque esto reduce la capacidad de hidratación inicial, a diferentes temperaturas. A temperaturas más altas, entre 50 y 60°C, una red más densa puede impedir la rápida pérdida de agua atrapando las moléculas de agua durante más tiempo.

La estructura más rígida y entrecruzada de CPE4 puede ser menos susceptible a la desnaturalización y colapso de la red polimérica a altas temperaturas. Esto significa que CPE4 podría mantener su integridad estructural y su capacidad de retención de agua mucho mejor que los hidrogeles con menor grado de entrecruzamiento. También, la presencia de un mayor número de enlaces entrecruzados en los hidrogeles puede aumentar la interacción entre el polímero y las moléculas de agua dificultando que el agua se escape del hidrogel incluso a temperaturas más altas.

En base a lo anterior, CPE4 destaca como el polímero más eficaz para retener agua a temperaturas elevadas. Por lo tanto, este hidrogel es potencialmente más adecuado para aplicaciones en condiciones áridas donde la retención de humedad es crucial. Por su parte, CPE1 y CPE2 funcionan bien a temperaturas más bajas, pero pierden eficacia a medida que aumenta la temperatura, lo que

sugiere que podrían ser más adecuados para aplicaciones en cultivos desarrollados a temperatura controlada. CPE3 presenta un rendimiento intermedio en términos de retención de agua y podría ser utilizado en aplicaciones donde se requiera un balance entre costo y eficacia. Por lo general, la retención de agua disminuye significativamente con el aumento de la temperatura por lo que se destaca la importancia de seleccionar el tipo de polímero más idóneo en función de la temperatura previsto para su aplicación. Por lo anterior, se decidió seleccionar los polímeros CPE3 y CPE4 como soporte para el cultivo de lechuga en hidroponía debido a su destacada capacidad de retención de agua a diferentes temperaturas. Estas características han sido cruciales para mantener un medio hidropónico óptimo, asegurando que las plantas dispongan de un suministro constante de agua, incluso bajo condiciones de temperatura variable.



**Figura 19.** Pérdida de Agua en CPE1, CPE2, CPE3 Y CPE4 a 30, 40 50 y 60 °C en un periodo de 24 h.

### VI.1.10 Porcentaje de adsorción de metales pesados

En esta investigación, se evalúa la capacidad de adsorción de metales pesados por cada hidrogel en presencia de soluciones acuosas de sales de tres metales muy específicos cobre (Cu), Zinc (Zn) y Cadmio (Cd). La tabla 8 presenta los porcentajes de adsorción de tres metales pesados (Zn, Cd y Cu) por cada tipo de hidrogeles (CPE1, CPE2, CPE3 y CPE4) utilizados y los resultados son los siguientes:

Los resultados obtenidos sugieren que todos los hidrogeles evaluados poseen una alta capacidad para retener iones de zinc (Zn), cadmio (Cd) y cobre (Cu), lo cual indica un potencial prometedor en la adsorción de metales pesados. En particular, la retención de zinc fue alta en todos los hidrogeles, superando el 99%, lo que sugiere una afinidad favorable por este ion. De manera similar, se observó una retención elevada para el cadmio, con valores entre 98.8% y 99.1%, lo que muestra la efectividad de los hidrogeles en adsorber este metal.

Para el cobre, aunque los valores de retención fueron menores en comparación con zinc y cadmio, se observó una adsorción significativa, entre 94.1% y 96.2%. Esto indica que, aunque los hidrogeles tienen afinidad por los tres metales, la retención para el cobre fue algo inferior. Este comportamiento podría estar relacionado con diferencias en las interacciones iónicas y en la afinidad de la red polimérica de los hidrogeles por cada ion metálico.

Es importante señalar que, dado que no se realizó un análisis estadístico formal ni un diseño experimental estructurado, estas observaciones deben interpretarse como una aproximación inicial. Con base en los valores observados, se concluye que los copolímeros muestran una alta y comparable capacidad de adsorción de metales pesados, lo cual sugiere su potencial para la remoción de metales pesados en soluciones acuosas, particularmente en el caso de zinc y cadmio, donde las tasas de retención superaron el 98%.

**Tabla 8.** *Porcentaje de retención de metales pesados en CPE1, CPE2, CPE3 Y CPE4. Solución con 0.5 g de hidrogel a una concentración de 10 mg/L en 100 ml de agua bidestilada.*

Polímero	Retención de Metales Pesados (%)		
	Zn	Cd	Cu
CPE1	99.3	98.8	94.9
CPE2	99.8	98.8	94.6

CPE3	99.6	98.9	96.2
CPE4	99.8	99.1	94.1

Zn: zinc, Cd: cadmio, Cu: cobre, CPE: copolímero entrecruzado ( 1-4, refiere al grado de entrecruzamiento 5,10,15,y 25 wt% respectivamente)

## VI.2 Desempeño de hidrogeles en sistemas biológicos

### VI.2.1 Bioensayos en lechuga (*Lactuca sativa*) con metales pesados en hidroponía

Para esta investigación se germinó lechuga orejona (Figura 20a) en macetas con un sustrato inerte (peat moss y perlita) con riego cada dos días con solución nutritiva (Figura 5), durante 4 semanas (Figura 20b), crecidas bajo condiciones óptimas de humedad y temperatura en cámara de crecimiento, alcanzando un 98 % de germinación. Durante el tiempo de crecimiento 4 semanas previas a su trasplante, las plántulas de lechuga habrían desarrollado varias hojas verdaderas, mostrando un crecimiento vigoroso. Las hojas jóvenes presentaron un color verde intenso y una textura suave y tierna.



**Figura 20.** Cultivo de *Lactuca sativa* L. en maceta crecidas en sustrato de Peat Moss y perlita. a) plántulas con 15 días de germinación. b) plántulas con 4 semanas de germinación.

Posterior al trasplante se procedió a la aplicación de los tratamientos con metales pesados y polímeros y se observó el crecimiento de la lechuga en hidroponía durante 4 semanas.

La lechuga se adaptó bien al cultivo en sistemas hidropónicos (Figura 21). Esto permitió estudiar de

manera precisa el efecto de los hidrogeles adsorbentes de metales pesados en las plantas. Las hojas crecieron considerablemente desde la etapa de plántulas con una forma alargada y puntiaguda. Se observaron numerosas raíces secundarias y laterales, facilitando el intercambio de nutrientes y contaminantes presentes en el medio. El tallo se observó más robusto y rígido en comparación con las etapas anteriores.



**Figura 21.** Comparativo del crecimiento del cultivo de *Lactuca sativa L.* (lechuga) en sistema hidropónico al inicio y final del tratamiento. a) Lechuga el día de trasplante previo a la aplicación de los tratamientos y b) lechuga (control) con 3 semanas de tratamiento SB15. c y d) Lechuga (Zinc) en tratamiento SB1 y SB5.

### VI.2.2 Análisis de la Eliminación de Metales Pesados de la Solución Nutritiva en Tratamientos Hidropónicos

La tabla 9 muestra la efectividad de los tratamientos con dos hidrogeles (CPE3 y CPE4) para la eliminación de metales pesados (Cd, Cu, Zn) de la solución nutritiva en tratamientos hidropónicos. la eliminación de metales pesados se refiere a la cantidad de metal que ya no está presente en la solución nutritiva, ya sea que fue absorbido por las plantas o retenido en el hidrogel. y se contrasta con el control sin hidrogel. El porcentaje en la última columna indica el porcentaje de metal eliminado, sin especificar si los metales han sido absorbidos por las plantas o retenidos en los materiales utilizados. Los tratamientos aplicados mejoran notablemente la adsorción de metales

pesados en comparación con el control.

En los tratamientos con cadmio en presencia del hidrogel con 15 y 25 wt. % (SB2 y SB6), se observan eliminaciones del 97.1 y 99.8 % respectivamente, lo que indica que gran parte del cadmio ha sido removido de la solución nutritiva. Esto sugiere que los hidrogeles y las plantas juegan un papel importante en la captura del metal.

En el tratamiento de control, se logra una eliminación del 77.1 % del cadmio de la solución, lo que indica que, sin la presencia de hidrogeles, las plantas del sistema biológico han absorbido una mayor cantidad de metal. En el tratamiento con cobre en presencia del hidrogel con 25 wt. % (SB7), se remueve el 97.5 % del cobre de la solución nutritiva, mientras que el tratamiento con cobre en presencia del hidrogel con 15 wt. % (SB3) tiene una remoción del 91.9 %. Esto demuestra que ambos tratamientos son bastante efectivos en la eliminación de cobre de la solución nutritiva. En el tratamiento control, el 96.5 % del cobre es eliminado de la solución, lo que sugiere que las plantas están absorbiendo una cantidad significativa de este metal, ya que no hay presencia de polímeros que lo capten. El tratamiento con zinc en presencia del hidrogel con 15 wt. % (SB1) elimina el 99.7 % del zinc, siendo el más efectivo para este metal. El tratamiento con zinc en presencia del hidrogel con 25 wt. % (SB5) también muestra una alta eliminación con un 96.0 %. En el control, solo se elimina el 60.9 % del zinc de la solución inicial, lo que indica que las plantas de lechuga son capaces de absorber una mayor cantidad de zinc en comparación con otros metales.

En los tratamientos que incluyen hidrogeles, los metales son predominantemente eliminados de la solución nutritiva. Aunque no se especifica si los metales removidos están siendo absorbidos por las plantas o retenidos en los hidrogeles, el análisis indica que los tratamientos aplicados incrementan notablemente la eliminación de metales pesados en comparación con el control. En el tratamiento control, los metales son mayormente absorbidos por las plantas, lo que se confirma su naturaleza acumuladora de metales (Guzmán-Morales *et al.*, 2021).

**Tabla 9.** Concentración de metales pesados (ppm) en la solución nutritiva al inicio y al final del bioensayo y porcentaje de remoción en CPE3 y CPE4 (aplicados individualmente).

Polímero	Metal	Ci SN (ppm)	Cf SN (ppm)	% de Remoción (ppm)
CPE3		0.455	0.013	97.1
CPE4	Cd	0.455	0.001	99.8
Control		0.455	0.104	77.1
CPE3		3.955	0.321	91.9
CPE4	Cu	3.955	0.099	97.5
Control		3.955	0.138	96.5
CPE3		15.47	0.053	99.7
CPE4	Zn	15.47	0.193	96.0
Control		15.47	6.052	60.9

Ci SN= concentración inicial en solución nutritiva sin potasio, Cf SN= concentración final en solución nutritiva sin potasio, Remoción de SN=(Ci - Cf)/ Ci \* 100. CPE3= Copolímero con 15 wt%, CPE4= Copolímero con 25 wt%.

La Tabla 10 muestra los resultados de tratamientos con todos los metales (TM) en presencia del hidrogel con 15 wt. % (SB4) Y con TM en presencia del hidrogel con 25 wt. % (SB8) en los que cadmio (Cd), zinc (Zn) y cobre (Cu) están presentes simultáneamente en un sistema biológico, comparando la efectividad de dos hidrogeles frente a un control sin polímeros con TM (SB12). Se reportan las concentraciones iniciales y finales de cada metal en la solución nutritiva, junto con el porcentaje de eliminación.

#### *Comparación del porcentaje de remoción*

Al realizar el análisis comparativo entre las tablas 8 y 9, es importante destacar que los controles en ambos casos no contienen hidrogeles, lo que sugiere que los metales inicialmente presentes en la solución nutritiva pasaron en su mayoría a las plantas del sistema biológico.

La tabla 9 muestra que los porcentajes de remoción de cadmio (Cd) son muy elevados en los tratamientos, alcanzando 99.8 y 97.1 %, lo que indica una alta eficiencia de remoción. En el control,

se elimina solo el 77.1 %, lo que sugiere que una parte significativa del cadmio ha sido absorbida por las plantas. En la tabla 10 se observa que, en un sistema con todos los metales presentes simultáneamente, los porcentajes de remoción para el cadmio son menores, registrando un 76 % y 75 % en los tratamientos con TM en presencia del hidrogel con 25 wt. % (SB8) y con TM en presencia del hidrogel con 15 wt. % (SB4), respectivamente. En el tratamiento control sin polímero que contiene TM(SB12), se alcanza un 46 %, lo que indica una absorción parcial por parte de las plantas en ausencia de hidrogeles, mientras que el cadmio continúa disponible en la solución nutritiva.

Referido en la Tabla 9, se muestra los tratamientos con altos porcentajes de remoción de zinc (Zn), con 99.7 y 96.0 %. El control presenta un 60.9%, lo que sugiere que, sin polímeros, el zinc fue absorbido por las plantas y otra cantidad permanece disuelta en la solución nutritiva. En la tabla 10 se muestra los tratamientos con la presencia simultánea de todos los metales, los porcentajes de remoción de zinc son similares en los tratamientos, con 97 y 96 %. Sin embargo, el control muestra una remoción muy baja del 19 %, lo que indica que, ante la presencia simultánea de todos los metales, una gran cantidad de zinc ha sido adsorbida por las plantas en este sistema.

La Tabla 9 evidencia que los tratamientos eliminan el cobre (Cu) de manera efectiva, con porcentajes de 97.5 y 91.9 %. En el control, se remueve el 96.5 %, lo que indica que incluso sin hidrogeles, una cantidad significativa de cobre ha sido absorbida por las plantas. En la Tabla 10, los porcentajes de remoción de cobre en presencia simultánea de todos los metales es relativamente similar, con 95% y 87% en los tratamientos, sin embargo, es más bajo en el control con solo un 44%. Esto es similar a lo observado en cadmio y zinc.

A partir de lo anterior, en la Tabla 10, donde todos los metales están presentes simultáneamente, se observa una menor eficiencia de remoción para algunos metales, especialmente el cadmio y el cobre, en comparación con los resultados que se indican en la tabla 15, donde los metales se evalúan individualmente. Esto sugiere que la presencia de múltiples metales afecta la capacidad de remoción de cada uno. En ambos casos, los tratamientos en el sistema biológico con hidrogeles muestran una mejora significativa en la eliminación de los metales de la solución nutritiva en comparación con el control. En los controles, donde no se emplean hidrogeles, se asume que los metales removidos han sido absorbidos por las plantas.

**Tabla 10.** Concentración de metales pesados (ppm) en la solución nutritiva al inicio y al final del bioensayo y porcentaje de remoción en CPE3 y CPE4 (aplicados simultáneamente).

Polímero	Metales	Ci SN (ppm)	Cf SN (ppm)	% de remoción
	Cd	0.43	0.105	75
<b>CPE3</b>	Zn	19.188	0.611	96
	Cu	3.316	0.133	95
	Cd	0.43	0.102	76
<b>CPE4</b>	Zn	19.188	0.518	97
	Cu	3.316	0.406	87
	Cd	0.43	0.230	46
<b>Control</b>	Zn	19.188	15.47	19
	Cu	3.316	1.851	44

Ci SN= concentración inicial en solución nutritiva sin potasio, Cf SN= concentración final en solución nutritiva sin potasio, Remoción de SN=(Ci - Cf)/ Ci \* 100, CPE3= Copolímero con 15 wt%, CPE4= Copolímero con 25 wt%.

### VI.2.3 Retención de Metales Pesados (Cd, Cu, Zn) en Tejidos Vegetales e Hidrogeles en Sistemas Biológicos Hidropónicos

Con el fin de ilustrar la cantidad de metales pesados retenidos en los tejidos de las plantas, en la solución nutritiva y en los hidrogeles se ha optado por presentarlos gráficamente en la Figura 22. En el conjunto hidrogel más planta, el porcentaje de retención de metales asignado a los hidrogeles se calculó como la diferencia entre la cantidad inicial del metal en la solución nutritiva y la cantidad final de metal en la planta (sin incluir el tallo), más la cantidad de metal remanente en la solución nutritiva.

$$\% \text{ de retención de metal en el hidrogel} = \frac{C \text{ inicial de la solución nutritiva} - (C \text{ final de la solución nutritiva} + C \text{ en la planta})}{C \text{ inicial de la solución nutritiva}} * 100$$

El análisis se enfoca en los porcentajes retenidos en los tejidos (raíz y hoja) de las plantas e hidrogeles, sugiriendo que las diferencias observadas en los controles se le atribuye a la presencia de metales en los tallos de las plantas, los cuales no fueron considerados en este análisis, ya que no son los principales órganos de acumulación de metales. Los tratamientos en los sistemas biológicos con zinc, cadmio y cobre (SB9, SB10 y SB11) actúan como controles, sin la presencia de hidrogeles, lo que permite evaluar cómo se comportan los metales cuando no se cuenta con una barrera de adsorción.

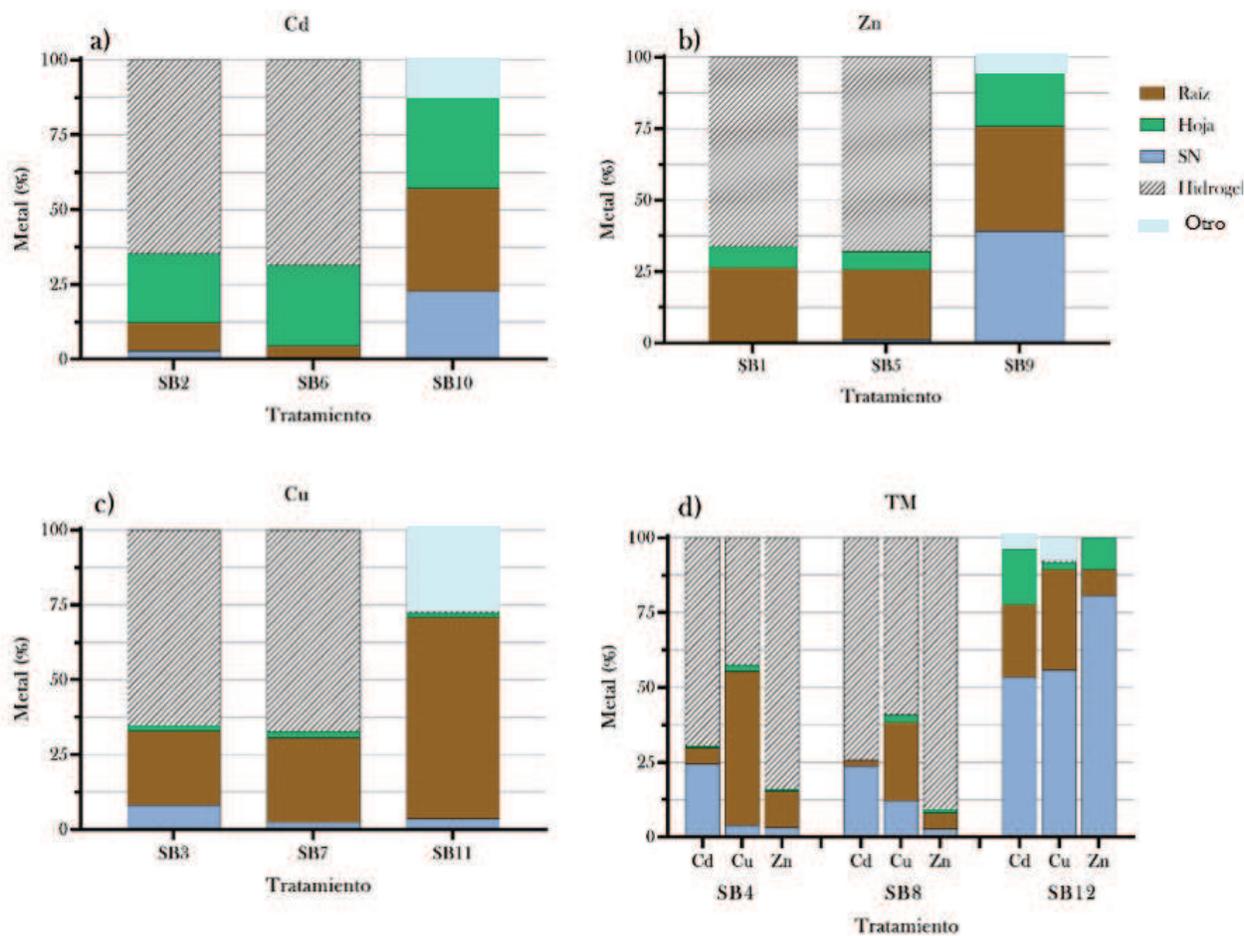
En el caso del cadmio, en el sistema biológico con cadmio SB2 (con CPE3, Figura 22a), el 32.5 % se retiene en la planta (23.1 % en hoja y 9.4 % en raíz) y el 64.6 % en el hidrogel. Sin embargo, en el sistema biológico control con cadmio (SB10), el 64.8 % del cadmio se retiene en la planta, lo que indica que, en ausencia de polímeros, las hojas de la planta absorben la mayor parte del cadmio, lo que aumenta el riesgo de toxicidad. Para el cobre, en el sistema biológico con 15 wt% SB3 (Figura 22c), el hidrogel retiene el 65.2 %, mientras que el 26.6 % queda en la planta (1.9 % en hoja y 24.7 % en raíz). En el sistema biológico control, con cobre (SB11), el 68.9 % del cobre se retiene en la planta (1.5 % en hoja y 67.4 % en raíz), lo que sugiere que, sin hidrogeles el metal se acumula más fácilmente en los tejidos vegetales, especialmente en raíz. En cuanto al zinc, en el sistema biológico con zinc (SB1) y con polímero CPE3 con 15 wt% (Figura 22b), el 66.3 % del metal se adsorbe en el polímero y solo el 33.4 % se retiene en la planta (7.3 % en hoja y 26.1 % en raíz). En el sistema biológico control, con zinc (SB9), el 56.4 % del zinc se encuentra en la planta y 39.1 % permanece en la solución nutritiva, lo que demuestra que, sin polímeros, una gran parte del metal disponible es absorbido por las plantas.

En los tratamientos con polímeros, los metales pesados son mayormente retenidos por el material adsorbente, lo que reduce significativamente su acumulación en las plantas. En contraste, en los controles con Zn Cd, y Cu respectivamente (SB9, SB10 y SB11), sin la presencia de polímeros, los metales se acumulan en gran medida en los tejidos vegetales, lo que afecta negativamente el crecimiento de las plantas.

La Figura 22d refleja un sistema donde todos los metales están presentes simultáneamente. Se presentan los porcentajes de retención de cadmio (Cd), cobre (Cu) y zinc (Zn) en las plantas y en los hidrogeles utilizados en un sistema biológico en el que todos los metales están presentes conjuntamente. Los resultados del tratamiento del sistema biológico con todos los metales en

conjunto (Zn, Cd y Cu) SB4 (15wt%) y SB8(25 wt%) evidencian que, la retención del cadmio en las plantas es mucho menor (6.05% y 2.09%) en presencia de otros metales, mientras que los hidrogeles son más eficientes en la captura del cadmio cuando todos los metales están presentes (aprox. 70%). La presencia de múltiples metales puede aumentar la competencia entre ellos, favoreciendo la adsorción del cadmio por los hidrogeles y reduciendo su absorción por la planta. En el caso del cobre, la planta retiene más cobre, especialmente en la raíz (51.3 % en raíz y 2.23 % en hoja, SB4 con 15wt%), con una menor retención en los polímeros (entre 40-60%). La menor adsorción de cobre por los hidrogeles en presencia de otros metales puede deberse a una menor afinidad por el cobre frente a otros metales como el cadmio o el zinc tal como se observó en la discusión de la Tabla 8. Esto hace que el cobre se absorba más por la planta. Con respecto al zinc, cuando todos los metales están presentes, la planta retiene mucho menos zinc (6.6-13 %), con una mayor retención por los polímeros (entre 85-90 %). A diferencia del cobre, el zinc parece ser más competitivo cuando está presente junto a otros metales. Los hidrogeles muestran una mayor afinidad por el zinc en presencia de varios metales, lo que disminuye su absorción por la planta. Esto puede ser el resultado de interacciones específicas entre los metales que favorecen la adsorción del zinc.

La interpretación de los resultados sugiere que, en algunos casos, como el cadmio y el zinc, la competencia entre metales aumenta la eficacia de los hidrogeles para retener los metales y reduce su adsorción por la planta. Sin embargo, en el caso del cobre, la capacidad de retención de los hidrogeles disminuye en presencia de otros metales, lo que aumenta su absorción en las plantas. Estos resultados indican que la competencia entre metales afecta la eficacia de los hidrogeles y la distribución de metales en el sistema biológico. Aunque algunos estudios han demostrado que los hidrogeles pueden adsorber múltiples metales pesados simultáneamente, aunque con variaciones en la eficiencia dependiendo de la concentración y la afinidad de los metales, Jason *et al.*, (2022). El comportamiento de la adsorción y retención de metales varía cuando se analizan de forma individual (Figura 22a-c) o cuando están presentes de forma conjunta (Figura 22d).



**Figura 22.** Porcentaje de metales pesados en hojas, raíz, solución nutritiva sin potasio e hidrogel. El sistema biológico hidropónico consta de tratamientos con a) cadmio, b) zinc, c) cobre y d) los tres metales simultáneamente. Las siglas corresponden a: SB2 (Cadmio + hidrogel con 15 wt%), SB6 (Cadmio + hidrogel con 25 wt%), SB10 (Control con Cadmio), SB1 ((Zinc + hidrogel con 15wt%), SB5 (Zinc + hidrogel 25 wt%), SB9 (Control con Zinc), SB3 (Cobre + hidrogel 15 wt%), SB7 (Cobre + hidrogel 25 wt%), SB11 (Control con Cobre), SB4 (Todos los metales + hidrogel 15 wt%), SB8 (Todos los metales + hidrogel 25 wt%) y SB12 (Control + todos los metales).

#### VI.2.4 Determinación de Biomasa y Potasio (K) en *Lactuca sativa* L.

Las Figuras 22 y 23 muestran la producción de biomasa seca en hojas y raíces de *Lactuca sativa* bajo distintas condiciones de crecimiento en un sistema hidropónico tras 4 semanas de tratamiento con el polímero CPE3 (15 wt%) o CPE4 (25 wt%). En el tratamiento del sistema biológico control, con solución nutritiva completa (SB15), se incluyeron todos los nutrientes esenciales, incluido el potasio. En los demás tratamientos, el potasio fue liberado de manera controlada por los polímeros CPE3

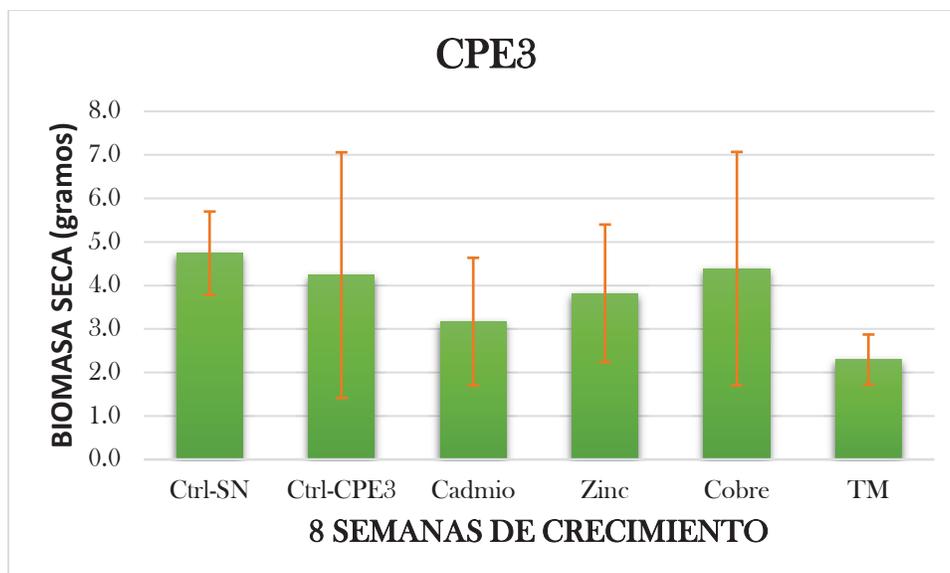
(15 wt%) o CPE4 (25 wt%), respectivamente. Es posible que, en estos tratamientos, el potasio competía con los metales pesados presentes en la solución por los sitios de absorción en la raíz de la planta, lo cual podría influir en la disponibilidad y absorción de ambos elementos. En el tratamiento control SB15, la biomasa alcanzó 4.74 g, lo que indica un crecimiento saludable de las plantas en condiciones donde se proporcionaban todos los nutrientes esenciales. Las plantas no estuvieron expuestas a metales pesados, lo que favoreció un desarrollo sin restricciones. En el sistema biológico del tratamiento con hidrogel con 15 wt% (SB13), la biomasa fue de 4.24 g, lo que muestra una leve diferencia con respecto al control, aunque no se realizó un análisis estadístico para confirmar la significancia de esta diferencia. Este resultado evidencia que el polímero CPE3 (15 wt%) fue eficaz en la liberación controlada de potasio, permitiendo un crecimiento casi comparable al del control. La leve reducción en la biomasa puede atribuirse a la liberación del potasio en comparación con su disponibilidad inmediata en la solución nutritiva del control.

Con la presencia de cadmio en el sistema biológico SB2 (cadmio + hidrogel 15wt%), la biomasa disminuyó a 3.17 g (Figura 23), los resultados indican que el polímero CPE3 (15 wt%) adsorbió una cantidad significativa de este metal, impidiendo que las plantas acumularan cadmio en la raíz. Por esta razón, y a pesar de la presencia de cadmio, las plantas lograron mantener un crecimiento moderado. El tratamiento con zinc produjo una biomasa de 3.82 g, ligeramente inferior al control, pero con un desarrollo adecuado. Aunque no se observaron signos visibles de fitotoxicidad por el zinc, la menor producción de materia seca se sugiere que podría deberse a otros factores que influyen en el crecimiento de la planta, como un posible desequilibrio nutricional o la competencia entre el zinc y otros nutrientes esenciales. El 10 % menos de materia seca en comparación con el tratamiento SB13 con CPE3 (15 wt%) puede no estar relacionado únicamente con la presencia de zinc, sino con una combinación de variables que afectan el crecimiento de la planta en un entorno hidropónico (Marschner, 2011). El zinc, siendo un micronutriente esencial, no mostró signos visibles fitotóxicos en este caso. Además, la capacidad del polímero para adsorber el exceso de zinc parece haber favorecido un crecimiento saludable, aunque no se realizó un análisis estadístico para confirmar estos resultados

El mayor rendimiento observado en el tratamiento SB1 (Zinc + hidrogel 15 wt%) en comparación con SB3 (Cobre + hidrogel 15 wt%) se sugiere que puede deberse a la función crucial del zinc como micronutriente esencial y su mayor demanda por parte de la planta, en comparación con el cobre. Aunque CPE3 (15 wt%) retuvo más zinc que cobre, la absorción de zinc podría haber tenido un impacto más positivo en el crecimiento general de las plantas, favoreciendo un mayor rendimiento

en SB3 (Cobre + hidrogel 15 wt%). La reducción drástica de la biomasa en el tratamiento SB4 (Todos los metales + hidrogel 15 wt%) se sugiere que podría deberse a una interacción negativa entre los metales pesados (Zn, Cd y Cu), lo que implica un efecto adverso conjunto. Existen estudios que indican que la combinación de metales pesados puede tener un impacto mayor en las plantas (cultivadas en suelo) en comparación con la exposición a un solo metal, afectando procesos fisiológicos clave como la absorción de nutrientes (Gong, *et al*, 2020). Aunque el polímero removió parte de estos metales y liberó potasio, la presencia conjunta de los metales afectó de manera más severa el crecimiento de la planta, en especial de las raíces (0.7 gramos de raíz y 1.6 gramos de hoja). La presencia simultánea de varios metales pesados en el sistema hidropónico generó un impacto más perjudicial que cuando los metales estaban presentes de forma individual. El impacto combinado de los metales pesados (Cd, Cu y Zn) en la solución nutritiva se sugiere que puede provocar una reducción significativa en la biomasa de las plantas. Estos metales pueden interactuar entre sí, afectando la absorción de nutrientes esenciales, lo que crea un entorno menos favorable para el crecimiento vegetal. Este tipo de interacción desfavorable entre los metales puede alterar procesos fisiológicos de la planta, reduciendo su capacidad para desarrollar biomasa de manera óptima (Sarwar *et al*, 20215) . Los iones metálicos pueden competir por los mismos sitios de adsorción de nutrientes en la planta, disminuyendo la eficiencia en la absorción de nutrientes esenciales. Además, la presencia conjunta de varios metales pesados puede incrementar el estrés oxidativo, una variable que no fue posible medir en este estudio. La literatura indica que la presencia de metales pesados causa daños en proteínas, lípidos y ácidos nucleicos, y afecta negativamente procesos metabólicos clave como la fotosíntesis y la respiración (Shanti *et al.*, 2009; Prieto *et al.*, 2009., Ramírez *et al*, 2019).

El uso de hidrogeles como CPE3 (15 wt%) indicó una capacidad considerable para adsorber metales pesados (Cd, Cu, Zn) y, al mismo tiempo, liberar potasio de manera controlada, lo cual parece haber contribuido a reducir la concentración de metales en la solución nutritiva.



**Figura 23.** Producción de Biomasa de *Lactuca sativa L.* a las 8 semanas de germinación con 4 semanas de tratamiento CPE3 (15 wt%). Ctrl-SN (tratamiento control correspondiente al sistema biológico SB15) no contiene hidrogel ni metales, Ctrl-CPE3 (tratamiento control con hidrogel 15 wt%), TM (todos los metales).

En la Figura 24 se presentan los resultados en el que se indica la producción de materia seca de *Lactuca sativa L.* a las 8 semanas de germinación. Para el tratamiento control, sin hidrogel y sin ningún metal (SB15) con una materia seca de 4.74 g, refleja el crecimiento óptimo de las plantas bajo condiciones donde se proporcionan todos los nutrientes esenciales, incluido el potasio, de manera continua a través de la solución nutritiva.

El tratamiento con hidrogel (25 wt%) SB14, con 4.49 g de materia seca, presentó un rendimiento similar al del control (que no contenía ni hidrogel ni metales), lo cual sugiere que el polímero fue eficaz en la liberación de potasio. Aunque la materia seca fue ligeramente inferior, esta diferencia podría estar relacionada con la liberación gradual de potasio del polímero en comparación con la disponibilidad inmediata de este nutriente en la solución nutritiva del control, aun así, esta liberación controlada parece haber favorecido un desarrollo adecuado de hojas y raíces.

La biomasa en presencia de cadmio en el tratamiento SB6 (con hidrogel 25wt%) fue de 3.21 gramos, lo que refleja la capacidad del polímero CPE4 (25 wt%) para adsorber una cantidad significativa de este metal tóxico. Aunque el cadmio inhibe parcialmente el crecimiento de las plantas, la acción del polímero evitó que las plantas absorbieran concentraciones que pudieran comprometer gravemente su desarrollo, permitiendo un crecimiento moderado.

En el tratamiento con hidrogel 25 wt% en presencia de zinc (SB5), la biomasa alcanzó 3.52 gramos,

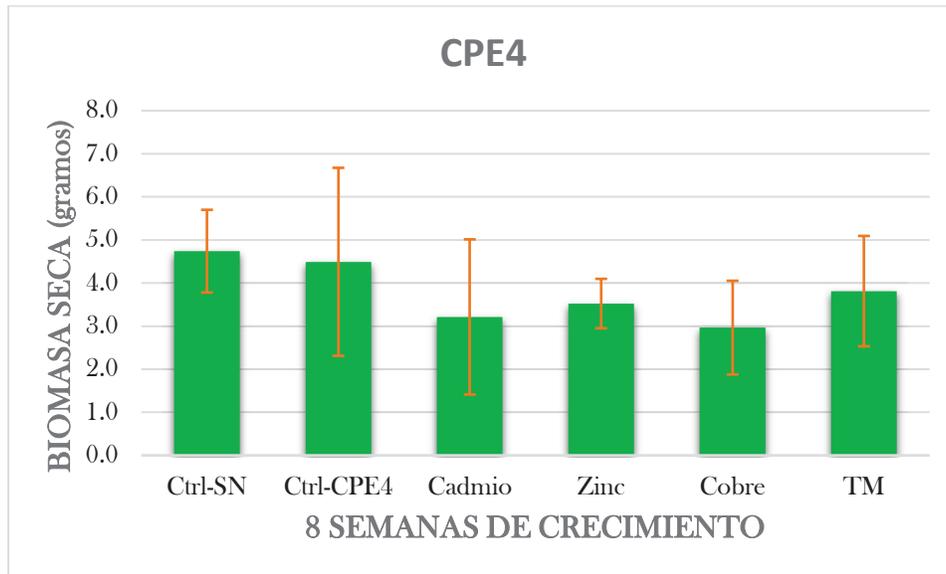
una disminución leve en comparación con el control, pero aún dentro de un rango de crecimiento adecuado. El zinc, como micronutriente esencial, fue manejado eficazmente por el polímero, que adsorbió cualquier exceso del metal, manteniendo el crecimiento vegetal sin efectos adversos notables.

La biomasa en el tratamiento con hidrogel 25 wt% en presencia de cobre (SB7) fue de 2.97 gramos, indicando una reducción moderada en el crecimiento en comparación con el control. Aunque el cobre es necesario en pequeñas cantidades para las plantas, su exceso puede ser perjudicial. El polímero adsorbió eficazmente parte del cobre, evitando que su acumulación excesiva afectara más gravemente el desarrollo de las plantas.

En el tratamiento con hidrogel 25 wt% en presencia de todos los metales (SB8), dada una combinación de metales pesados, la biomasa fue de 3.81 gramos, lo que muestra un impacto moderado en el crecimiento. A pesar de que la biomasa fue inferior a la del control, fue considerablemente mayor que en los tratamientos individuales SB6 (con hidrogel 25 wt% en presencia de cadmio) y SB7 (con hidrogel 25 wt% en presencia de cobre). Esto sugiere que, aunque la presencia conjunta de varios metales afecta el crecimiento, el polímero CPE4 (25 wt%) logró adsorber eficazmente los metales y liberar potasio, lo que permitió un desarrollo relativamente saludable.

El polímero CPE4 (25 wt%) demostró una notable eficiencia tanto en la adsorción de metales pesados como en la liberación controlada de potasio en comparación con CPE3 (15 wt%), lo que podría atribuirse a su grado de entrecruzamiento. Esto permitió que las plantas mantuvieran niveles de biomasa cercanos al control, especialmente en los tratamientos con zinc y cobre, donde ambos son micronutrientes esenciales en bajas concentraciones. Si bien el cadmio redujo notablemente la biomasa, ningún metal alcanzó concentraciones lo suficientemente altas como para comprometer significativamente el crecimiento de las plantas. Además, el tratamiento combinado de metales pesados mostró un crecimiento intermedio, lo que indica que la interacción de los diferentes metales tuvo un impacto negativo, pero no tan severo como los tratamientos individuales con cadmio o cobre. De manera global, ambos hidrogeles exhibieron un desempeño eficiente en la adsorción de metales pesados y en la liberación controlada de potasio. Sin embargo, CPE4 (25 wt%) mostró una mayor eficacia en mantener una biomasa cercana al tratamiento control en la mayoría de los casos, destacándose especialmente en el tratamiento SB8, donde logró una biomasa considerablemente superior a la de CPE3 (15 wt%). A pesar de esto, CPE3 (15 wt%) se distinguió en los tratamientos SB (hidrogel 15 wt% en presencia de Zinc) y SB3 (hidrogel 15 wt% en presencia de Cobre),

evidenciando un mejor rendimiento en la adsorción de estos metales y mitigando sus efectos adversos sobre el crecimiento de las plantas.



**Figura 24.** Producción de Biomasa de *Lactuca sativa* L. a las 8 semanas de germinación con 4 semanas de tratamiento CPE4. Ctrl-SN (tratamiento control correspondiente al sistema biológico SB15) no contiene hidrogel ni metales, Ctrl-CPE4 (tratamiento control con hidrogel 25 wt%), TM (todos los metales).

#### VI.2.5 Potasio (K) en *Lactuca sativa* L. (lechuga): Un macronutriente esencial para el crecimiento y desarrollo.

Los resultados relacionados con la cantidad calculada de potasio liberado por los hidrogeles CPE3 (15 wt%) y CPE4 (25 wt%), es relevante destacar que estos valores son fundamentales para el análisis comparativo entre los diferentes tratamientos observados en los gráficos. La cantidad calculada de potasio liberado por cada hidrogel CPE3 (15 wt%) y CPE4 (25 wt%) fue de 467.4 mg/L y 429.5 mg/L, respectivamente. Estos datos representan una referencia crucial para evaluar la eficiencia de cada polímero en la liberación de potasio, especialmente cuando se analiza su interacción con metales pesados en los tratamientos. Estos datos son clave para interpretar la disponibilidad real de potasio para las plantas en cada escenario presentado en las siguientes Figuras.

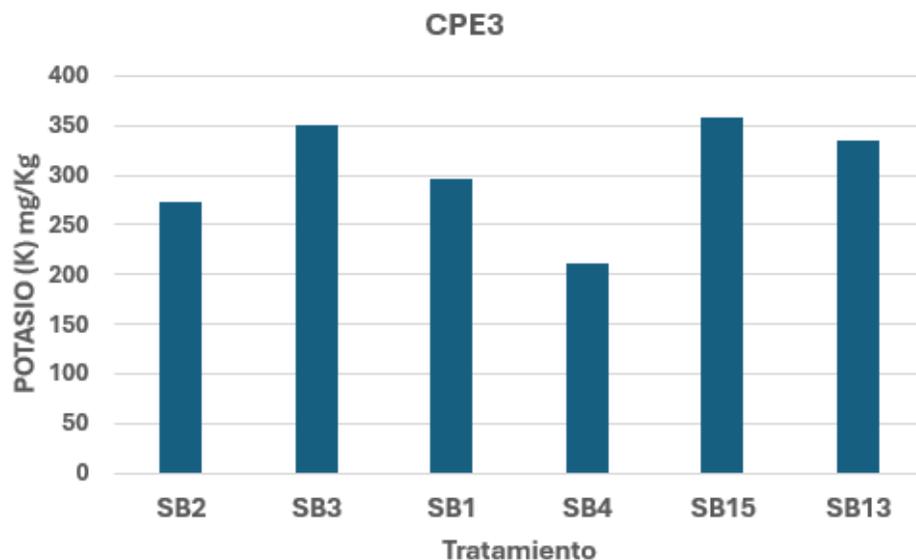
Las Figuras 25 y 26 presentan la concentración de potasio en la planta (raíz y hojas) en diferentes tratamientos con el uso de los hidrogeles CPE3 (15 wt%) o CPE4 (25 wt%), respectivamente. Los hidrogeles evaluados mostraron potencial para actuar como reservorios de agua, adsorber metales pesados y liberar potasio. Esta liberación de potasio parece haber influido en su disponibilidad en la

solución nutritiva, lo cual podría haber favorecido el crecimiento y desarrollo de las plantas en los tratamientos con hidrogeles en comparación con los controles.

Como parte del análisis de los tratamientos realizados en este estudio, se destaca SB15 tratamiento control sin polímero ni metales (Figura 25) que sirve como control al proporcionar una solución nutritiva completa. En este tratamiento control, la solución nutritiva suministra todos los nutrientes esenciales, incluyendo el potasio en su forma más disponible y fácilmente accesible para las plantas. La concentración de potasio en SB15 alcanza un valor cercano a 350 mg/L, lo que refleja la máxima disponibilidad del nutriente que está en la planta en el sistema biológico hidropónico. Tal como se mencionó en la sección de materiales y métodos, el tratamiento SB15 recibió una solución nutritiva preparada con 450 ppm de nitrato de potasio, lo que equivale a 174 ppm de potasio (K). Sin embargo, considerando que el agua destilada utilizada de la caldera de CIQA contenía 26.3 ppm adicionales de potasio y que se realizó un recambio de solución a la semana 6, es posible que la concentración total de potasio alcanzara un valor cercano a 350 mg/L. Este valor refleja la máxima disponibilidad de potasio en el sistema hidropónico, influenciada tanto por el aporte inicial como por el recambio de la solución nutritiva.

En el tratamiento con hidrogel 15 wt% sin metales (SB13), la concentración de potasio de aproximadamente 300 mg/L fue calculada en función de la estructura del hidrogel CPE3 (15 wt%) y su capacidad de liberar potasio. Este valor estimado se basa en la cantidad de AMPS-K presente en el polímero y los estudios preliminares sobre su comportamiento de liberación de nutrientes. Aunque el valor de la concentración de potasio en SB13 (tratamiento con hidrogel 15 wt% sin metales) es menor que en el tratamiento control sin hidrogel y sin metales (SB15), la diferencia observada no parece afectar significativamente la eficiencia del polímero en la liberación de potasio. El crecimiento y desarrollo de las plantas demostraron que el potasio liberado por el polímero fue absorbido eficientemente, lo que resultó en un desarrollo adecuado de la materia seca, comparable al tratamiento control. En los tratamientos con hidrogel 15 wt% en presencia de zinc (SB1) y cobre (SB3), la concentración de potasio varía entre 290 y 350 mg/L. La absorción de potasio (K) en plantas puede verse comprometida por la presencia de metales pesados como zinc (Zn) y cobre (Cu). Esto se debe a que los metales pesados interfieren en los procesos fisiológicos y bioquímicos de las plantas, afectando el transporte de nutrientes esenciales como el potasio. Diversos estudios han demostrado que la presencia de metales pesados puede alterar la absorción de nutrientes, ya que los iones de estos metales pesados compiten con los nutrientes por los sitios de transporte de las raíces. Esta

competencia disminuye la eficiencia en la absorción de nutrientes como el potasio, lo que afecta negativamente el desarrollo de las plantas (Shahid *et al.*, 2015). Los tratamientos con hidrogel 15 wt% en presencia de cadmio (SB2) y en presencia de todos los metales (SB4) muestran las concentraciones más bajas de potasio, aproximadamente 270 mg/L y 210 mg/L, respectivamente. Esto indica que los metales en estos tratamientos están afectando de manera significativa la capacidad de la planta para absorber potasio, lo que sugiere una influencia negativamente en su crecimiento. El tratamiento del sistema biológico SB13 con hidrogel 15 wt% (CPE3) indicado en la figura 25, en ausencia de metales, demuestra una alta eficiencia en la liberación de potasio dentro del sistema biológico. No obstante, cuando los metales están presentes, como en los tratamientos SB2 (hidrogel 15 wt% en presencia de Cadmio), SB3 (hidrogel 15 wt% en presencia de cobre) , SB1(hidrogel 15 wt% en presencia de Zinc) y SB4 (hidrogel 15 wt% en presencia de todos los metales), la concentración de potasio en la planta se ve afectada.



**Figura 25.** Concentración de Potasio (K) en mg/Kg en *Lactuca sativa L.* (lechuga) por materia seca con CPE3. Las siglas corresponden a: SB2 (hidrogel 15 wt% CPE3 en presencia de cadmio), SB3 (hidrogel 15 wt% en presencia de Cobre), SB1 (hidrogel en presencia de Zinc), SB4 (hidrogel 15 wt% en presencia de todos los metales), SB15 (tratamiento control, sin hidrogeles ni metales), SB13 (tratamiento control en presencia de hidrogel 15 wt% sin metales).

En la Figura 26 el tratamiento sin hidrogel ni metales (SB15), que sirve como control, muestra una de las concentraciones más altas de potasio, cercana a 350 mg/Kg. Este tratamiento, al contener una solución nutritiva completa con todos los nutrientes esenciales, asegura una óptima disponibilidad

de potasio para las plantas. El tratamiento con hidrogel 25 wt% (SB14), en el cual el polímero CPE4 (25 wt%) actúa como liberador de potasio en ausencia de metales pesados, presenta una concentración de potasio ligeramente superior al control, alrededor de 380 mg/Kg. Esto demuestra la alta eficiencia del polímero en liberar potasio de manera controlada, permitiendo que el nutriente esté ampliamente disponible para las plantas. Los tratamientos con hidrogel 25 wt% en presencia de cadmio (SB6) y cobre (SB7) muestran concentraciones de potasio alrededor de 200 mg/Kg, lo que indica que la presencia de metales ha reducido la eficiencia de la planta para absorber potasio. El tratamiento con hidrogel 25 wt% en presencia de zinc (SB5) se observa una concentración de potasio de aproximadamente 280 mg/Kg, que es más alta en comparación con los tratamientos SB6 y SB7. Esto sugiere que, a pesar de la presencia de metales, particularmente zinc, la absorción de potasio por la planta no se ve significativamente afectada.

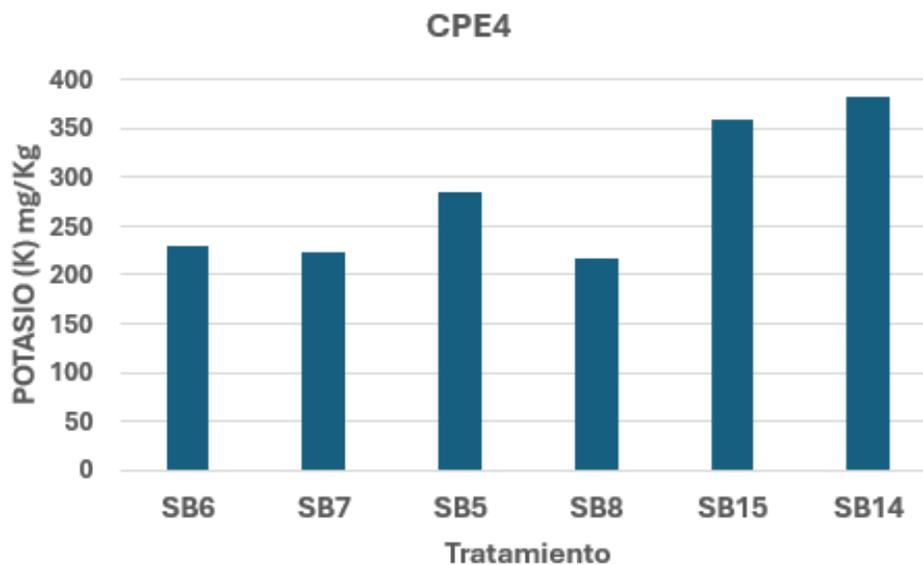
En zinc como micronutriente es esencial para las plantas y juega un papel importante en el crecimiento y desarrollo de éstas. En el caso de SB5, tratamiento con hidrogel 25 wt% en presencia de zinc, las concentraciones probadas en este estudio no parecen interferir con la absorción de potasio. Esto sugiere que el zinc, en niveles moderados, no afectó negativamente el transporte o la disponibilidad del potasio en las células de la planta.

En contraste, los tratamientos con hidrogel 25 wt% en presencia de cadmio (SB6) y cobre (SB7), aunque tienen concentraciones de potasio más bajas, podrían estar influenciados por los metales presentes como el cadmio o el cobre, que impactan de manera más directa en la capacidad de la planta por adsorber potasio. Ambos metales son conocidos por su capacidad para interferir con la absorción de nutrientes esenciales. En el tratamiento con hidrogel 25 wt% en presencia de todos los metales (SB8), donde la concentración de potasio es cercana a 200 mg/Kg, se observa la cifra más baja entre todos los tratamientos. Esto sugiere que la presencia simultánea de varios metales pesados en este tratamiento afecta significativamente la eficiencia de la absorción de potasio por parte de la planta.

Cuando están presentes múltiples metales, como el cadmio, cobre y zinc, se genera una competencia por los sitios de adsorción tanto en el polímero como en la planta, lo que reduce la disponibilidad de potasio para la absorción. Estos metales pueden interferir en los mecanismos de transporte de potasio en las raíces, bloqueando o compitiendo por los canales iónicos que son esenciales para la entrada de potasio en las células vegetales. Además, la acumulación de metales pesados en el sistema puede generar estrés oxidativo en las plantas, lo que afecta negativamente su capacidad para absorber

y utilizar nutrientes como el potasio.

Estos resultados son consistentes con la biomasa obtenida en los mismos tratamientos, ya que la disponibilidad y absorción adecuada de potasio están directamente relacionadas con el crecimiento y desarrollo de las plantas. La disminución en la concentración de potasio en presencia de metales pesados podría explicar la reducción en la biomasa observada en los tratamientos, lo que refuerza la relación entre la eficiencia del polímero CPE3 (15 wt%) y CPE4 (25 wt%) para adsorber los metales pesados y el rendimiento biológico de las plantas. Cabe destacar que en ninguno de los tratamientos las plantas mostraron signos de toxicidad.



**Figura 26.** Concentración de Potasio (K) en mg/Kg en *Lactuca sativa L.* (lechuga) por materia seca con CPE4. Las siglas corresponden a: SB6 (hidrogel 25 wt% CPE3 en presencia de cadmio), SB7 (hidrogel 25 wt% en presencia de Cobre), SB5 (hidrogel en presencia de Zinc), SB8 (hidrogel 25 wt% en presencia de todos los metales), SB15 (tratamiento control, sin hidrogeles ni metales), SB14 (tratamiento control en presencia de hidrogel 25 wt% sin metales).

## VII. CONCLUSIONES

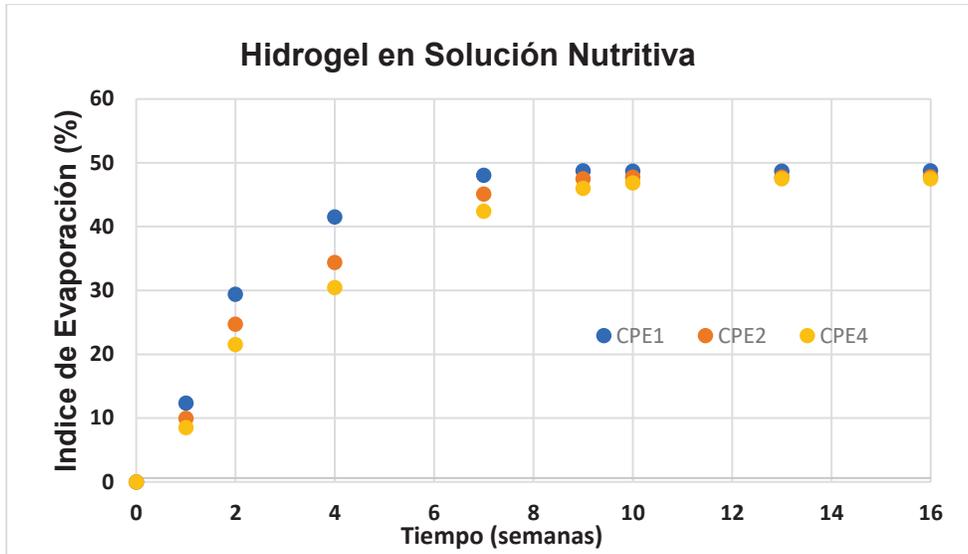
En el transcurso de esta investigación, se logró la síntesis y caracterización exitosa de polímeros hidrosolubles mediante la técnica de polimerización RAFT, así como de hidrogeles a través de polimerización radical convencional. Se evaluaron las propiedades fisicoquímicas de los polímeros hidrosolubles, confirmando su potencial en diversas aplicaciones. Asimismo, los hidrogeles presentaron propiedades destacables, tales como una alta capacidad de retención de agua, adsorción eficiente de metales pesados y liberación controlada de potasio como macronutriente. Estos resultados sugieren que los hidrogeles sintetizados pueden constituir un soporte efectivo para la optimización de cultivos hidropónicos.

Se logró la preparación de diversos copolímeros lineales, tanto en bloque como aleatorios, mediante la polimerización radical de acrilamida y un monómero derivado de esta, el AMPS-K. A través de la polimerización radical convencional, se logró la síntesis de cuatro copolímeros entrecruzados, también conocidos como polímeros superadsorbentes, utilizando distintos niveles de agente de entrecruzamiento. A partir de los análisis de resonancia magnética nuclear de protón ( $^1\text{H NMR}$ ) se logró identificar los enlaces específicos de acrilamida y AMPS-K en los copolímeros, confirmando la correcta incorporación de monómeros. En infrarrojo (IR) se confirmó la presencia de los grupos funcionales amida, sulfonato y potasio (K) en la estructura de los copolímeros, lo cual valida la inclusión de estos grupos en los hidrogeles o polímeros superadsorbentes. La cromatografía por permeación de gel (SEC), determinó la distribución de tamaño y se evidenció la estructura química de los copolímeros sintetizados. Las mediciones realizadas revelaron resultados que destacan las propiedades de los copolímeros entrecruzados. La capacidad de hidratación alcanzó hasta 2750 veces el peso seco del hidrogel en agua destilada, lo que resalta su excelente retención de agua. El porcentaje de retención de metales fue particularmente elevado, logrando >94% para cobre (Cu), >98% para cadmio (Cd) y >99% para zinc (Zn), evidenciando una alta capacidad de adsorción de estos contaminantes. Estos resultados demostraron que los copolímeros entrecruzados presentan propiedades destacables, lo que los posiciona como materiales potencialmente útiles como hidrogeles o superadsorbentes. Estas características sugieren su viabilidad para aplicaciones en diversas áreas, como soporte en prácticas de agricultura sustentable y moderna.

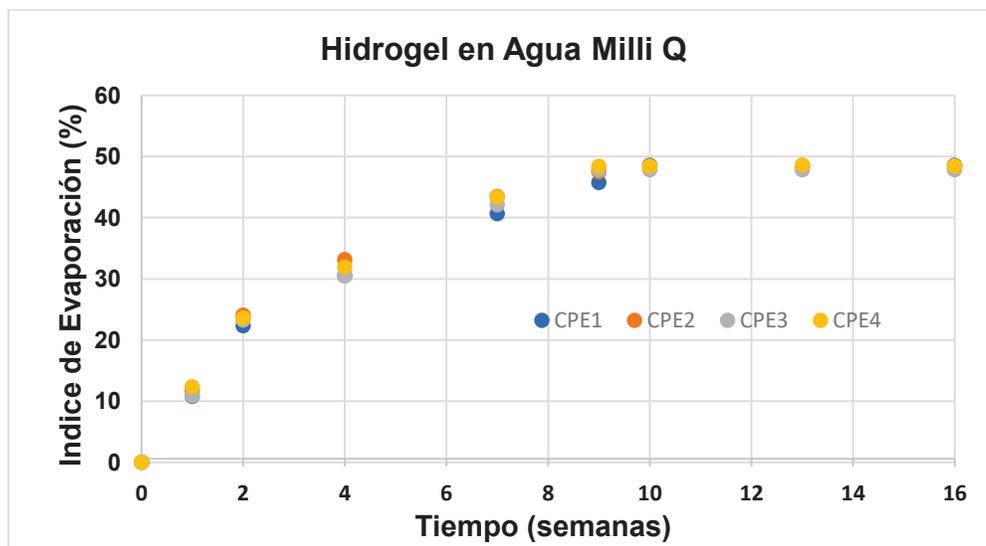
En esta investigación exploratoria se evaluó el efecto de los hidrogeles en el desarrollo de un sistema biológico basado en el cultivo de lechuga en medio hidropónicos. Los sistemas biológicos llevados a cabo en presencia de hidrogeles demostraron una baja pérdida de agua en comparación con el control. Se evidenciaron que los hidrogeles fueron capaces de liberar iones de potasio un elemento fundamental para el crecimiento de la lechuga. Además; los copolímeros entrecruzados demostraron excelentes capacidades para absorber iones de metales como el Cu, Zn y Cd previamente adicionados a los sistemas biológicos. En cuanto a la biomasa, los sistemas biológicos desarrollados en presencia de hidrogeles presentaron resultados prácticamente similares al control la cual confirma un excelente desarrollo de los sistemas biológicos conteniendo hidrogeles. Finalmente, los sistemas biológicos en presencia hidrogeles demostraron una excelente capacidad para retener metales pesados como Cu, Zn y Cd evitando la migración de los iones metálicos hacia las raíces y sobre todo las hojas que son parte consumibles de la Lechuga.

Con base en los resultados preliminares descritos en este trabajo de tesis, se puede concluir que los hidrogeles representan una alternativa prometedora para el desarrollo de una agricultura más sustentable en sistemas hidropónicos. Sin embargo, es importante enfatizar la necesidad de llevar a cabo estudios futuros que incluyan análisis estadísticos, con el fin de confirmar y cuantificar de manera más concluyente el impacto del grado de entrecruzamiento de los hidrogeles en el desarrollo de sistemas biológicos hidropónicos, tomando como modelo el cultivo de lechuga.

## ANEXO



A1. Índice de evaporación de agua en CPE1, CPE2, CPE3 Y CPE4 en solución nutritiva.



A2. Índice de evaporación de agua en CPE1, CPE2, CPE3 Y CPE4 en agua MilliQ.



**A3.** Vista panorámica del cultivo de lechuga en sistema hidropónico con hidrogeles en los diferentes tratamientos, las plantas tienen 7 semanas de crecimiento (3 semanas en tratamiento). El sistema hidropónico fue implementado en el invernadero IBT002 del campo experimental de CIQA.

**A4.** Concentración de metales pesados (Cd, Cu, Zn) en la solución nutritiva inicial y final y en las hojas y raíces de lechuga en un sistema biológico hidropónico. Concentraciones en ppm.

Polímero	Metal	SB	Ci SN	Cf SN	Cf hoja	Cf raíz	C otro*
CPE3		2	0.455	0.013	0.105	0.043	0.294
CPE4	Cd	6	0.455	0.001	0.122	0.020	0.312
Control		10	0.455	0.104	0.139	0.156	0.056
CPE3		3	3.955	0.321	0.075	0.979	2.580
CPE4	Cu	7	3.955	0.099	0.090	1.108	2.658
Control		11	3.955	0.138	0.061	2.664	1.092
CPE3		1	15.47	0.053	1.133	4.033	10.251
CPE4	Zn	5	15.47	0.193	0.984	3.773	10.520
Control		9	15.47	6.052	3.053	5.678	0.687

Ci= concentración inicial, Cf= concentración final, SN= solución nutritiva, SB= tratamiento de sistema biológico.

\*C otro=Ci en SN- (Cf en SN + Cf en raíz + Cf en hoja). C otro se asume se encuentra en el polímero en los tratamientos

con CPE3 y CPE4. C otro en los controles se atribuye a metales en los tallos de las plantas que fueron descartados durante el análisis.

**A5. Concentración de metales pesados (Cd, Cu, Zn) en la solución nutritiva inicial y final y en las hojas y raíces de lechuga en un Sistema Biológico Hidropónico con todos los metales presentes simultáneamente. Concentraciones en ppm.**

Polímero	Metales	SB	Ci SN	Cf SN	Cf hoja	Cf raíz	C otro*
CPE3	Cd		0.43	0.105	0.003	0.023	0.299
	Zn	4	19.188	0.611	0.165	2.322	16.090
	Cu		3.316	0.133	0.074	1.702	1.407
CPE4	Cd		0.43	0.102	0.001	0.008	0.319
	Zn	8	19.188	0.518	0.258	1.018	17.394
	Cu		3.316	0.406	0.085	0.865	1.960
Control	Cd		0.43	0.230	0.080	0.104	0.016
	Zn	12	19.188	15.47	2.017	1.681	0.020
	Cu		3.316	1.851	0.079	1.115	0.271

Ci= concentración inicial, Cf= concentración final, SB= tratamiento de sistema biológico.

\*C otro=Ci en SN-(Cf en SN + Cf en raíz + Cf en hoja). C otro se asume se encuentra en el polímero en los tratamientos con CPE3 y CPE4. C otro en los controles se atribuye a metales en los tallos de las plantas que fueron descartados durante el análisis.

**A6. Concentración en ppm de potasio (K) en diferentes fuentes de agua destilada**

K en agua bidestilada (MilliQ)	K en agua destilada de la Caldera CIQA
0.0	26.3

## XII. REFERENCIAS

Amin, H., Arain, B.A., Jahangir, T.M., Abbasi, M.S. y Amin, F. (2018). Accumulation and distribution of lead (Pb) in plant tissues of guar (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) and sesame (*Sesamum indicum* L.): profitable phytoremediation with biofuel crops Hira. *Geology, Ecology and Landscapes*, 2(1), 51-60. <https://doi.org/10.1080/24749508.2018.1452464>

Amrita Sharma ., Poorn Prakash Pande., Prateek Khare., Kuldeep Kumar. (2023) A Study of Polyacrylamide-Pumice Composite for Fast Removal of Copper Ions from Aqueous Solutions: Synthesis, Kinetics and Thermodynamics. *Iran. J. Chem. Chem. Eng.* Volume 42, Issue 6 - Serial Number 128. doi. 10.30492/IJCCE.2022.551167.5262

Albuja, V., Andrade, J., Carlos, L., y Michelle, R. (2021) Comparativa de las ventajas de los sistemas hidropónicos como alternativas agrícolas en zonas urbanas. *Revista Minerva de Investigación Científica* vol. 2, nº 4. DOI: <https://doi.org/10.47460/minerva.V2I4.26>

Ahmaruzzaman, Md., Prerona Roy, Adrián Bonilla-Petriciolet, Michael Badawi, Sharanabasava V. Ganachari, Nagaraj P. Shetti, Tejraj M. Aminabhavi. (2023). Polymeric hydrogels-based materials for wastewater treatment. *Chemosphere*, Volume 331. 138743. ISSN 0045-6535. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138743>.

Ahmad, W., Alharthy, R.D., Zubair, M. *et al.* Toxic and heavy metals contamination assessment in soil and water to evaluate human health risk. *Sci Rep* 11, 17006 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94616-4>

Ashok Bora, Dimpee Sarmah, Niranjana Karak. (2024) Multifunctional Hydrogels. *Multifunctional Hydrogels*. 1st Edition. First Published, Pages 18. ISBN9781003340485

Akalin, G. O., y Pulat, M. (2020). Controlled release behavior of zinc-loaded carboxymethyl cellulose and carrageenan hydrogels and their effects on wheatgrass growth. *Journal of Polymer Research*, 27(1). <https://doi.org/10.1007/s10965-019-1950-y>

Andrada, H., y Di Barbaro, G. (2018). Efecto de la aplicación de copolímeros sobre el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.). *Revista de Ciencias Agrícolas*, 35(2), 27-35. <https://doi.org/10.22267/rcia.183502.89>

Ayat Allah Al-Massaedha, Fawwaz I. Khalilib. (2021) Removal of heavy metal ions from aqueous solution by anionic polyacrylamide-based monolith: equilibrium, kinetic and thermodynamic studies. *Desalination and Water Treatment*. 10.5004/dwt.2021.27339

Bastidas, F., López, S., Castro, L., Christian, F. (2022). Implementación de sistemas de oxigenación para mejorar el desarrollo de plantas en invernaderos de horticultura. *Polo del Conocimiento. Pol. Con.* (Edición núm. 70) Vol. 7, No 7. *Pol. Con.* (Edición núm. 70) Vol. 7, No 7

Benítez, José L. Daniel Contreras, Pablo Guzmán, Arnaldo Ramírez, José L. Prin, Blanca Rojas de Gáscue. (2011) Estudio de la difusión y cinética de hinchamiento en hidrogeles de poliacrilamida. *Revista Iberoamericana de Polímeros. Difusión y cinética de hinchamiento en hidrogeles. Volumen*

12(6).

Calderón-Sáenz, F., Ambrosio Carrillo, R. (2001). El uso del Tensiómetro como herramienta para la toma de decisiones de riego en los cultivos hidropónicos bajo invernadero. Chang, L., Xu, L., Liu, Y., y Qiu, D. (2021). Superabsorbent polymers used for agricultural water retention. *Polymer Testing*, 94, 107021. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.10702>

Cahuana, Lizardo, & Aduvire, Osvaldo. (2019). Bioacumulación de metales pesados en tejidos de vegetación acuática y terrestre evaluados en áreas donde existen pasivos ambientales mineros en el Perú. *Revista de Medio Ambiente y Minería*, 4(2), 19-36. [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2519-53522019000200002&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2519-53522019000200002&lng=es&tlng=es).

Cisneros, E., Zayas, R., Cun, G., Herrera, J., y González, F. (2020). Efecto de los polímeros súper absorbentes en la economía del agua para uso agrícola. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 21(1), 1-13. <https://reviberpol.org/2020/01/01/efecto-de-los-polimeros-super-absorbentes-en-la-economia-del-agua-para-uso-agricola/>

Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo. (2022, 20, 05) Uso del hidrogel para la agricultura. <https://www.ciad.mx/uso-del-hidrogel-para-la-agricultura/>

Covarrubias, S. A., y Peña Cabriales, J. J. (2017). Contaminación ambiental por metales pesados en México: Problemática y estrategias de fitorremediación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33, 7-21. <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.esp01.01>

Clemente Huachen, Josué Pedro, Medina Contreras, Jefferson, Pfuño, Johel Daniel Laura, Pariona Aguilar, Luis Angel, & Gutiérrez Vilchez, Pedro Pablo. (2021). Fitorremediación en suelos contaminados con Cd usando girasol (*Helianthus annuus* L. var. Sunbright). *Acta Agronómica*, 70 (2), 163-170. <https://doi.org/10.15446/acag.v70n2.94208>

Chenxi Zhao, Guangyang Liu, Qiyue Tan, Mingkun Gao, Ge Chen, Xiaodong Huang, Xiaomin Xu, Lingyun Li, Jing Wang, Yaowei Zhang, Donghui Xu. (2023) Polysaccharide-based biopolymer hydrogels for heavy metal detection and adsorption. *Journal of Advanced Research*, Volume 44, Pages 53-70. ISSN 2090-1232. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2022.04.005>.

D. Thompson , Prabhakar Deshpande, Omar Yadav. ( 2022) Polyacrylamide polymers for the removal of heavy metals: A review *Jason International Journal of Advances in Engineering and Management (IJAEM)* Volume 4, Issue 9 Sep. 2022, pp: 181-186 [www.ijaem.net](http://www.ijaem.net) ISSN: 2395-5252

Díaz, R. (2017). Ventajas y desventajas del análisis por ICP-MS de metales pesados en muestras biológicas. *Boletín Instituto Nacional de Salud*, 23(8), 54-63. 34 Fernández, I. (2003). Polímeros en solución y aplicación de los polímeros en la industria petrolera. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 1-14. <http://www.ehu.es/reviberpol/pdf/DIC/>

Di Salvatore, Mina & Carafa, Anna & Mingo, Antonio & Carratù, G. (2012). Evaluation of heavy metal toxicity on radish: comparison between soil and floating hydroponics systems. *Am J Exp Agric*. 2. 174-185.

Dipankar Das, Priyambada Prakash, Prasanta K. Rout, Sachin Bhaladhare. (2021) Síntesis y caracterización de hidrogel superabsorbente a base de celulosa para aplicaciones agrícolas. *Starch*. Volumen 73 , Número 1-2. <https://doi.org/10.1002/star.201900284>

Domínguez, F. (2015) Estudio cinético de la adsorción de Zn con hidrogeles. <https://hdl.handle.net/20.500.12371/12555>

El-Halah, A., González, N., Contreras, J. *et al.* (2020). Efecto del disolvente de síntesis en la capacidad de hinchamiento de los hidrogeles de poli(acrilamida). *J Polym Res* **27**, 21 <https://doi.org/10.1007/s10965-019-1988-x>

Galán Huertos, E., y Romero Baena, A. (2008). Contaminación de Suelos por Metales Pesados. *Macla*, 10, 48-60.

Gangadevi Sennakesavan, Mohammad Mostakhdemin, L.K. Dkhar, Ali Seyfoddin, S.J. Fatihhi.(2020) Acrylic acid/acrylamide based hydrogels and its properties - A review, *Polymer Degradation and Stability*, Volume 180,109308, ISSN 0141-3910, <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109308>.

Gong, Bing & He, Erkai & Qiu, Hao & Gestel, Cornelis & Romero-Freire, Ana & Zhao, Ling & Xu, Xiaoyun & Cao, Xinde. (2020). Interactions of arsenic, copper, and zinc in soil-plant system: Partition, uptake and phytotoxicity. *Science of The Total Environment*. 745. 140926. [10.1016/j.scitotenv.2020.140926](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140926).

Guzmán-Morales, Ambar & Paz, Orestes & Carmenate, Ramiro & Valdés Hernández, Pedro. (2021). Evaluation of heavy metal contamination and accumulation in lettuce (*Lactuca sativa* L.) plants. 42.

Grande Carlos D., Zuluaga, Fabio. (2010) Polimerización por adición, fragmentación y transferencia reversible, RAFT: una revisión del mecanismo y el alcance de la técnica. *Revista Iberoamericana de Polímeros*. Polimerización radical. Volumen 11(6).

Hamilton, J. G., Law, E. E., y Rooney, J. J. (1997). Metathesis polymerization as a route to water soluble polymers and hydrogels. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 115(1), 1-9. [https://doi.org/10.1016/S1381-1169\(96\)00076-3](https://doi.org/10.1016/S1381-1169(96)00076-3) Hermida, É. (2011). Capítulo 9: Polímeros. *Colección Materiales y materias primas.*, 2, 70. [http://www.inet.edu.ar/wp-content/uploads/2012/11/09\\_Polimeros.pdf](http://www.inet.edu.ar/wp-content/uploads/2012/11/09_Polimeros.pdf)

Huang, Jin & Gotoh, Takehiko & Nakai, Satoshi & Ueda, Akihiro. (2024). Functional Hydrogels Promote Vegetable Growth in Cadmium-Contaminated Soil. *Gels*. 10. 348. [10.3390/gels10050348](https://doi.org/10.3390/gels10050348).

Huang, J., Wang, C., Qi, L., Zhang, X., Tang, G., Li, L., Guo, J., Jia, Y., Dou, X., y Lu, M. (2020). Phosphorus is more effective than nitrogen in restoring plant communities of heavy metals polluted soils. *Environmental Pollution*, 266, 115259. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115259>

Huang, Haohe., Qifeng Yang, Chongxing Huang, Lanyu Zhang, (2022). Facile and low-cost

fabrication of composite hydrogels to improve adsorption of copper ions. *Environmental Technology & Innovation*, Volume 27, 102427, ISSN 2352-1864, <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102427>.

Imtiaz, H., Mir, AR, Corpas, FJ *et al.* (2023). Impacto de la falta de potasio en la absorción, el transporte, la fotosíntesis y la tolerancia al estrés abiótico. *Regulación de crecimiento vegetal* **99**, 429-448 <https://doi.org/10.1007/s10725-022-00925-7>

Jarrin, M. L. T. (2018). Propiedades de los polímeros en estado sólido. El acervo integracionista en Europa y América, 13-38. <https://doi.org/10.2307/j.ctvgd1wp.3> Kadajji, V. G., y Betageri, G. V. (2011). Water soluble polymers for pharmaceutical applications. *Polymers*, 3(4), 1972-2009. <https://doi.org/10.3390/polym3041972>

Kadhim, S.A., Hameed, A.M., Rasheed, R.T. *et al.* Superabsorbent Polymers Cross-linked with AlCl<sub>3</sub>: Synthesis, Characterization, and Potential for Sustainable Agriculture. *emergent mater.* (2024). <https://doi.org/10.1007/s42247-024-00685-2>

Kashem, M.A., Singh, B.R., Huq, S.M.I. *et al.* (2008). Cadmium Phytoextraction Efficiency of Arum (*Colocasia antiquorum*), Radish (*Raphanus sativus* L.) and Water Spinach (*Ipomoea aquatica*) Grown in Hydroponics. *Water Air Soil Pollut* **192**, 273-279 <https://doi.org/10.1007/s11270-008-9654-7>

Kaur, P., Agrawal, R., Pfeffer, FM *et al.* (2023). Hidrogeles en la agricultura: perspectivas y desafíos. *J Polym Environ* **31**, 3701-3718 <https://doi.org/10.1007/s10924-023-02859-1>

Kuppardt, A., Vetterlein, D., Harms, H. *et al.* Visualisation of gradients in arsenic concentrations around individual roots of *Zea mays* L. using agar-immobilized bioreporter bacteria. *Plant Soil* **329**, 295-306 (2010). <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0154-3>

Ladislav, S., El-Mufleh, A., Gérente, C. *et al.* (2012). Potencial de los macrófitos acuáticos como bioindicadores de la contaminación por metales pesados en la escorrentía de aguas pluviales urbanas. *Contaminación del agua, el aire y el suelo* **223**, 877-888 <https://doi.org/10.1007/s11270-011-0909-3>

Lara-Herrera \*\*, A., de la Rosa-Rodríguez, R., & Trejo-Téllez, LI (2023). Crecimiento y rendimiento de lechuga (*Lactuca sativa* L.) bajo cinco proporciones de macronutrientes en solución nutritiva. *Bioagro*, 35 (2), 113-122. <https://doi.org/10.51372/bioagro352.4>

Lebkiri, Imane & Abbou, Brahim & Kadiri, Lamyia & Ouass, Abdelkarim & Essaadaoui, Youness & Ouaddari, Hanae & Lebkiri, Ahmed & Rifi, El. (2022). Polyacrylamide Hydrogel an Effective Adsorbent for the Removal of Heavy Metal from Aqueous Solution: Isotherm, Kinetic, and Thermodynamic Studies. *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 96. 1484-1492. 10.1134/S0036024422070159.

Liu, R., Zhang, H., y Lal, R. (2016). Effects of Stabilized Nanoparticles of Copper, Zinc, Manganese, and Iron Oxides in Low Concentrations on Lettuce (*Lactuca sativa* L.) Seed Germination:

Nanotoxicants or Nanonutrients Water, Air, and Soil Pollution, 227(1). <https://doi.org/10.1007/s11270-015-2738-2> 35

Liu, Y., Huang, Y., Zhang, C., Li, W., Chen, C., Zhang, Z., Chen, H., Wang, J., Li, Y., y Zhang, Y. (2020). Nano-FeS incorporated into stable lignin hydrogel: A novel strategy for cadmium removal from soil. *Environmental Pollution*, 264, 114739. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114739>

Liu, Y.; Liu, Z.; Qie, Z.; Wang, Z.; Sun, W. (2024). Optimizing Salt Leakage Mitigation and Comparing Sorption-Desorption Characteristics of Polyacrylamide-Based Hydrogels. *Polymers*, 16, 525. <https://doi.org/10.3390/polym16040525>

Lin Ma, Chunxiao Chai, Wenna Wu, Ping Qi, Xingcen Liu, Jingcheng Hao. (2023) Hydrogels as the plant culture substrates: A review. *Carbohydrate Polymers*, Volume 305, 120544, ISSN 0144-8617, <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.120544>.

López, F. (2005). Fundamentos de los Polímeros. VI Escuela Venezolana Para La Enseñanza De La Química, 63.

Loredo-Tovías, Marcos, Alcalá-Jáuregui, Jorge Alonso, García-Arreola, María Elena, Carballo-Méndez, Fernando de Jesús, Rodríguez-Fuentes, Humberto, Buendía-García, Alain, & Rodríguez-Ortiz, Juan Carlos. (2022). Concentración y transferencia de metales pesados en lechuga (*Lactuca sativa* L.) irrigadas con aguas tratadas. *Terra Latinoamericana*, 40, e1045. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1045>

Liu, Y., Vijver, M.G. & Peijnenburg, W.J.G.M. Impacts of major cations ( $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ) and protons on toxicity predictions of nickel and cadmium to lettuce (*Lactuca sativa* L.) using exposure models. *Ecotoxicology* **23**, 385-395 (2014). <https://doi.org/10.1007/s10646-014-1202-1>

Loyde De La Cruz, Luis Antonio, González Méndez, Blanca, Cruz Avalos, Ana Martha, & Loredo Portales, René. (2023). Suelos agrícolas y metales pesados, una relación tóxica que se puede remediar. *Epistemus (Sonora)*, 16(33), 93-98. <https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i33.228>

Lu Lilan , Chen Siting , Yang Weibo , Wu Yi , Liu Yingying , Yin Xinxing , Yang Yaodong , Yang Yanfang. (2023). Integrated transcriptomic and metabolomic analyses reveal key metabolic pathways in response to potassium deficiency in coconut (*Cocos nucifera* L.) Seedlings. *Frontiers in Plant Science*, volume 14. <https://www.frontiersin.org/journals/plantscience/articles/10.3389/fpls.2023.1112264>

Ma, L., Chai, C., Wu, W., Qi, P., Liu, X., & Hao, J. (2023). Hydrogels as the plant culture substrates: A review. *Carbohydrate Polymers*, 305, 120544. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.120544>

Macías Duarte, Rubén, Grijalva Contreras, Raúl Leonel, Robles Contreras, Fabián, López Carvajal, Arturo, & Núñez Ramírez, Fidel. (2019). Déficit de riego y aplicación de hidrogel en la productividad de olivo en regiones desérticas. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 10(2), 393-404. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i2.1751>

Marschner, H. (Ed.). (2011). *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. Academic press.

Martínez Carrillo, Gerardo, Lara Herrera, Alfredo, Padilla Bernal, Luz Evelia, Luna Flores, Maximino, Avelar Mejía, J. Jesús, & Llamas Llamas, J. Jesús. (2015). Evaluación técnica y financiera del cultivo de lechuga en invernadero, como alternativa para invierno. *Terra Latinoamericana*, 33(3), 251-260. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S018757792015000300251&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S018757792015000300251&lng=es&tlng=es).

Misiewicz, J.; Lejcućs, K.; Dłabrowska, J.; Marczak, D. (2019) The Characteristics of Absorbency Under Load (AUL) for Superabsorbent and Soil Mixtures. *Sci. Rep.*, 9, 18098.

Moreira, I. N., Martins, L. L., y Mourato, M. P. (2020). Effect of Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb and Zn on seed germination and seedling growth of two lettuce cultivars (*Lactuca sativa* L.). *Plant Physiology Reports*, 25(2), 347-358. <https://doi.org/10.1007/s40502-020-00509-5>

Md. Ahmaruzzaman, Prerona Roy, Adrián Bonilla-Petriciolet, Michael Badawi, Sharanabasava V. Ganachari, Nagaraj P. Shetti, Tejraj M. Aminabhavi. (2023) Polymeric hydrogels-based materials for wastewater treatment, *Chemosphere*, Volume 331, 138743, ISSN 0045-6535, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138743>.

Mroczek, E., Konieczny, P., Kleiber, T., & Waśkiewicz, A. (2014). Response of hydroponically grown head lettuce on residual monomer from polyacrylamide. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 31(8), 1399–1405. <https://doi.org/10.1080/19440049.2014.926401>

NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021. Diario oficial de la federación. <https://www.dof.gob.mx/>

NORMA oficial mexicana NMX-E-273-NYCE-2019. Diario oficial de la federación. <https://www.dof.gob.mx/>

NORMA Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002. Diario oficial de la federación <https://www.dof.gob.mx/>

Nandkishore Thombare, Sumit Mishra, M.Z. Siddiqui, Usha Jha, Deodhari Singh, Gopal R. Mahajan, (2018). Design and development of guar gum based novel, superabsorbent and moisture retaining hydrogels for agricultural applications. *Carbohydrate Polymers*, Volume 185, Pages 169-178. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.01.018>.

Odian, G. (s. f.). **PRINCIPLES OF POLYMERIZATION**. Ortega-Torres, A. E., Flores Tejeida, L. B., Guevara-González, R. G., Rico-García, E., y Soto-Zarazúa, G. M. (2020). Hidrogel acrilato de potasio como sustrato en cultivo de pepino y jitomate. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(6), 1447-1455. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i6.2222>

Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación. (2023). el estado mundial de la agricultura y la alimentación (1a. ed.). roma: FAO.

Palanivelu, SD, Gan, S., Salleh, KM . (2023). Evaluación del hidrogel de base biológica como medio de crecimiento alternativo para la germinación de semillas y el crecimiento de plántulas en la

agricultura urbana. *Celulosa* 30 , 7791–7803 <https://doi.org/10.1007/s10570-023-05334-1>

Palanivelu, S.D.; Armir, N.A.Z.; Zulkifli, A.; Hair, A.H.A.; Salleh, K.M.; Lindsey, K.; Che-Othman, M.H.; Zakaria, S. Hydrogel Application in Urban Farming: Potentials and Limitations—A Review. *Polymers* 2022, 14, 2590. <https://doi.org/10.3390/polym14132590>

Paulo-Mirasol, Sofia.; David Naranjo, Sonia Lanzalaco, Elaine Armelin, José García Torres, Juan Torras. (2024) Hydrogels for Wastewater Cleaning and Water Recovery. Multifunctional Hydrogels. 1st Edition. First Published, Pages 22. ISBN9781003340485

Park J. H. (2020). Contrasting effects of Cr(III) and Cr(VI) on lettuce grown in hydroponics and soil: Chromium and manganese speciation. *Environmental pollution (Barking, Essex : 1987)*, 266(Pt 2), 115073. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115073>

Pernía, Beatriz, Rojas-Tortolero, Diego, Sena, Lucía, Sisto, Angela de, Inojosa, Ysvic, & Naranjo, Leopoldo. (2018). FITOTOXICIDAD DE HAP, CRUDOS EXTRA PESADOS Y SUS FRACCIONES EN *Lactuca sativa*: UNA INTERPRETACIÓN INTEGRAL UTILIZANDO UN ÍNDICE DE TOXICIDAD MODIFICADO. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 34(1), 79-91. <https://doi.org/10.20937/rica.2018.34.01.07>

Pérez Martínez, I., y Romero, F. M. (2015). Uso de parámetros indirectos para la evaluación de la contaminación de suelos por metales pesados en una zona minera de San Luis Potosí, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67(1), 1-12. <https://doi.org/10.18268/bsgm2015v67n1a1>

Prieto Méndez, Judith., César A. González Ramírez, Alma D. Román Gutiérrez and Francisco Prieto García. (2009) Plant contamination and phytotoxicity due to heavy metals from soil and water. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10, 29 - 44

Priya, A.K.; Muruganandam, M.; Ali, S.S.; Kornaros, M. (2023) Clean-Up of Heavy Metals from Contaminated Soil by Phytoremediation: A Multidisciplinary and Eco-Friendly Approach. *Toxics*, 11, 422. <https://doi.org/10.3390/toxics11050422>

Radwan, M., Al-Sweasy, O. y Elazab, H. (2017) Preparación de hidrogel a base de acrilamida e investigación de diferentes factores que afectan la tasa y la cantidad de agua absorbida. *Ciencias Agrícolas*, 8 , 161-170. doi: [10.4236/as.2017.82011](https://doi.org/10.4236/as.2017.82011) .

Rajaseger G, Chan KL, Yee Tan K, Ramasamy S, Khin MC, Amaladoss A, Kadamb Haribhai P. Hydroponics: current trends in sustainable crop production. *Bioinformation*. 2023 Sep 30;19(9):925-938. doi: 10.6026/97320630019925. PMID: 37928497; PMCID: PMC10625363.

Ramirez, A., Benítez, J. L., De Astudillo, L. R., y De Gáscue, B. R. (2016). Materiales polímeros de tipo hidrogeles: Revisión sobre su caracterización mediante FTIR, DSC, MEB y MET. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 36(2), 108-130.

Rasha S. Ahmed, Mohamed E. Abuarab, Mohamed M. Ibrahim, Magdy Baioumy, Ali Mokhtar. (2023). Assessment of environmental and toxicity impacts and potential health hazards of heavy metals pollution of agricultural drainage adjacent to industrial zones in Egypt, *Chemosphere*, Volume

318, 137872, ISSN 0045-6535, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.137872>.

Rodríguez Parisca, Oscar Simón (2018). Conservación de suelos y agua: una premisa del desarrollo sustentable. Universidad Central de Venezuela, Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico. 2da Edición (Digital). ISBN: 978-980-00-2520-8

Rozo Torres, G., Rozo Torres, C. D., Escobar, H., y González, L. (2009). Adición de hidrogeles al suelo para germinación y cultivo de *Lactuca sativa* variedad Green Forest. Departamento de Ciencias Básicas, 2(5), 22. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.32587.08481> 36

Sandoya, Germán V\*, Jonael Bosques, y E. Vanessa Vassilaros. (2021) La producción de lechuga en sistemas hidropónicos a pequeña escala. Agricultural and Horticultural Enterprises. <https://doi.org/10.32473/edis-HS1433-2022>.

Sarwar, Nadeem & Ishaque, Wajid & Farid, Ghulam & Shaheen, Muhammad & Imran, Muhammad & Geng, Mingjian & Hussain, Saddam. (2015). Zinc-cadmium interactions: Impact on wheat physiology and mineral acquisition. Ecotoxicology and Environmental Safety. 122. 536. 10.1016/j.ecoenv.2015.09.011.

Semarnat, N. (2007). NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. Diario Oficial de la Federación, 69. Recuperado a partir de <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/147ssa16.html>

Serrano, F. L., y Mendizabal, E. (2015). Introducción a La Ciencia De Los Polímeros, (December), 288. Theriot, J. C., Lim, C. H., Yang, H., Ryan, M. D., Musgrave, C. B., y Miyake, G. M. (2016). Organocatalyzed atom transfer radical polymerization driven by visible light. Science, 352(6289), 1082-1086. <https://doi.org/10.1126/science.aaf3935>

Sayed Jamaledin Peighambaroust, Fateh Karimzadeh Halimi, Parisa Mohammadzadeh Pakdel, Hamid Safarzadeh (2024) Decontamination of methylene blue from aqueous media using alginate-bonded polyacrylamide/carbon black nanocomposite hydrogel. Polymers for advanced technologies, Volume35, Issue3. <https://doi.org/10.1002/pat.6336>

Shahid, M., Khalid, S., Abbas, G., Shahid, N., Nadeem, M., Sabir, M., Aslam, M., & Dumat, C. (2015). Heavy metal stress and crop productivity. In K. R. Hakeem (Ed.). *Crop production and global environmental issues* (pp.1-25). Switzerland: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-23162-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-23162-4_1)

Tariq Zaryab, Dure Najaf Iqbal, Muhammad Rizwan, Muhammad Ahmad, Muhammad Faheemb and Mahmood Ahmed. (2023) Significance of biopolymer-based hydrogels and their applications in agriculture: a review in perspective of synthesis and their degree of swelling for water holding. The Royal Society of Chemistry. <http://dx.doi.org/10.1039/D3RA03472K>

Tian, H., Cheng, S., Zhen, J. (2023). Superabsorbent Polymer with Excellent Water/Salt Absorbency and Water Retention, and Fast Swelling Properties for Preventing Soil Water Evaporation. *J Polym Environ* 31, 812–824. <https://doi.org/10.1007/s10924-022-02543-w>

Vo Thi Thu Ha, Le Quang Luan, Nguyen Thi Nu, Nguyen Thi Vang, Phan Dinh Thai Son, & Nguyen Quang Khanh (2007). Study On The Application Of Nutrient Immobilized Hydrogel As A Substrate For Hydroponics Culture (VAEC-AR--07). Dang Thi Hong (Ed.). Viet Nam

Wang, W., Narain, R., y Zeng, H. (2020). Hydrogels. Polymer Science and Nanotechnology: Fundamentals and Applications. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816806-6.00010-8>

Wang, T., Dai, Z., Kang, J., Fu, F., Zhang, T., & Wang, S. (2018). A TiO<sub>2</sub> nanocomposite hydrogel for hydroponic plants in efficient water improvement. *Materials Chemistry and Physics*, 215, 242-250. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2018.05.042>

Wang, Cheng-Chen, Qiao-Chu Zhang, Chang-An Yan, Guo-Yong Tang, Meng-Yan Zhang, Lena Q. Ma, Rong-Hui Gu, Ping Xiang. (2023) Heavy metal(loid)s in agriculture soils, rice, and wheat across China: Status assessment and spatiotemporal analysis. *Science of The Total Environment*, Volume 882. ISSN 0048-9697. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163361>.

Yang, F., Cen, R., Feng, W., Liu, J., Qu, Z., y Miao, Q. (2020). Effects of super absorbent polymer on soil remediation and crop growth in arid and semi-arid areas. *Sustainability (Switzerland)*, 12(18). <https://doi.org/10.3390/SU12187825>

Wang, Hongyu & Huang, Mengyuan & Li, Lu & Wang, Bin & Jiang, Can & Hu, Xiaoling & Xie, Yi & Chen, Rongfan & Guo, Wenbin & Xiao, Henglin & Wang, Mingfei & Zhou, Dao. (2024). Highly efficient copper ions removal by sodium alginate/sodium humate@Polyacrylamide: adsorption behavior and removal mechanism. *Water, Air, & Soil Pollution*. 235. 10.1007/s11270-024-07046-z.

Yang, L., Yang, Y., Chen, Z., Guo, C., y Li, S. (2014). Influence of super absorbent polymer on soil water retention, seed germination and plant survivals for rocky slopes eco-engineering. *Ecological Engineering*, 62, 27-32. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.10.019>

Zai-Yin Hu, Guangyan Chen, Shou-Hong Yi, Yaling Wang, Quanyi Liu, Ru Wang. (2021) Multifunctional porous hydrogel with nutrient controlled-release and excellent biodegradation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, volume 9, Issue 5,106146. ISSN 2213-3437. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106146>.

Smical Ana-Irina, Vasile Hotea, Vasile Oros, Jozsef Juhasz, Elena Pop.(2008) STUDIES ON TRANSFER AND BIOACCUMULATION OF HEAVY METALS FROM SOIL INTO LETTUCE. *Environmental Engineering and Management Journal* September/octubre 2008, Vol.7, No.5, 609-615 <http://omicron.ch.tuiasi.ro/EEMJ/>

Shanti Sharma, Henk Schat, Riet Vooijs, Luisa M. Van Heerwaarden (2009) Toxicología combinada de cobre, zinc y cadmio en mezclas binarias: efectos antagónicos, no aditivos y sinérgicos dependientes de la concentración sobre el crecimiento de las raíces en *Silene vulgaris* . *Toxicología química y ambiental*. <https://doi.org/10.1002/etc.5620180235>

Zárate, M. (2015) Manual de Hidroponía. Universidad Autónoma de México. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/232367/Manual\\_de\\_hidroponia.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/232367/Manual_de_hidroponia.pdf)

Zhibin Zhang, Hiroshi Fu, Zheng Li, Jianying Huang, Zhiwei Xu, Yuekun Lai, Xiaoming Qian, Songnan Zhang. (2022) Hydrogel materials for sustainable water resources harvesting & treatment: Synthesis, mechanism and applications. *Chemical Engineering Journal*, Volume 439, 135756, ISSN 1385-8947. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.135756>.