

Universidad de Los Andes
Facultad de Ciencias
Departamento de Química
Laboratorio de Polímeros y Catálisis Ziegler-Natta

Trabajo Especial de Grado para optar al título de Licenciado en Química

“Estudio de la liberación de un fertilizante en matrices de hidrogeles, para el mejoramiento en el desarrollo de plantas hortícolas ají dulce (*Capsicum frutescens*), caraotas rojas (*Vigna umbellata*”.

Br. Jorge Luis Arellano Santiago

Tutor: Prof. Fidel Ramón Muñoz Pinto

Mérida, 2021

Universidad de Los Andes
Facultad de Ciencias
Departamento de Química
Laboratorio de Polímeros y Catálisis Ziegler-Natta

Trabajo Especial de Grado para optar al título de Licenciado en Química

“Estudio de la liberación de un fertilizante en matrices de hidrogeles, para el mejoramiento en el desarrollo de plantas hortícolas ají dulce (*Capsicum frutescens*), caraotas rojas (*Vigna umbellata*”.

Br. Jorge Luis Arellano Santiago

Tutor: Prof. Fidel Ramón Muñoz Pinto

Mérida, 2021

Dedicatoria

A mis padres, Onofre y Marina,

por haberme apoyado incondicionalmente a lo largo de mis estudios, y a su gran bondad.

www.bdigital.ula.ve

Agradecimientos

Mis agradecimientos principalmente hacia mi tutor de tesis, el profesor Fidel Muñoz por haberme dado la oportunidad de desarrollar el presente estudio a pesar de las dificultades actuales. Su guía y apoyo académico fueron indispensables para el desarrollo de cada una de las etapas del proyecto.

Quiero agradecer al profesor Carmelo Roquete, miembro del Jurado de Tesis, por sus valiosas y pacientes recomendaciones para el mejoramiento del diseño experimental del proyecto. Igualmente, le agradezco el tiempo tomado por revisar cuidadosamente las secciones más importantes del mismo.

Finalmente, quiero agradecer a mi Madre, y mi hermana Dayana, por ser un apoyo moral en estos tiempos difíciles.

www.bdigital.ula.ve

Resumen

Para el estudio de adaptabilidad de una especie hortícola en el suelo estéril de San Juan de Lagunillas se empleó un hidrogel constituida por acrilamida co-ácido maléico (80:20) en cuya estructura se cargó un fertilizante soluble NPK para ser utilizado como fertilizante de liberación lenta empleando como cultivo de prueba una planta de pimiento dulce *Capsicum frutescens*.

Se estudió el periodo de supervivencia de la planta y la altura y ancho de hoja en función de la concentración de fertilizante % (p/p) empleando como referencias la planta tratada solo con hidrogel “blanco” y la planta sin tratamiento alguno “control”.

El periodo de supervivencia de las plantas tratadas con el fertilizante de liberación lenta para las respectivas cargas de fertilizante de 0.1%, 0.5%, 1.0% y 1.5%, fue de cuatro a cinco semanas, sin depender de la concentración de fertilizante cargada a la matriz; probablemente asociado a la salinidad característica del suelo empleado como consecuencia no se pudo evaluar la efectividad del fertilizante de liberación lenta en el desarrollo del cultivo hasta su fructificación.

Del análisis TGA y DSC indica que tanto el fertilizante de liberación lenta acrilamida co-ácido maléico (80:20)-NPK como el respectivo hidrogel presentan una estabilidad térmica superior a la requerida.

El análisis FT-IR determinó que la interacción entre la matriz acrilamida co-ácido maléico (80:20) y el fertilizante NPK en solución es de tipo iónica sin alterar la composición química del polímero.

Índice

RESUMEN	VI
INTRODUCCIÓN	X
MARCO TEÓRICO	1
1.- POLÍMEROS, POLIMERIZACIÓN Y FUNCIONALIDAD.....	1
1.1.- DE ACUERDO A SU ORIGEN	2
1.1.1.- <i>Polímeros Naturales</i>	2
1.1.2.- <i>Polímeros Sintéticos</i>	2
1.2.- DE ACUERDO A SU FORMA.....	2
1.2.1.- <i>Polímeros Lineales</i>	2
1.2.2.- <i>Polímeros Ramificados</i>	3
1.2.3.- <i>Polímeros Entrecruzados</i>	3
1.3.- DE ACUERDO A SU ESTRUCTURA	3
1.3.1.- <i>Polímeros Cristalinos</i>	3
1.3.2.- <i>Polímeros Semicristalinos</i>	3
1.3.3.- <i>Polímeros Amorfos</i>	4
1.4.- DE ACUERDO A SU COMPOSICIÓN	4
1.4.1.- <i>Homopolímeros</i>	4
1.5.2.- <i>Copolímeros</i>	4
1.5.- DE ACUERDO A SU APLICACIÓN INDUSTRIAL	5
1.5.1.- <i>Polímeros de Fibras</i>	5
1.5.2.- <i>Polímeros Elásticos</i>	5
1.5.3.- <i>Polímeros Plásticos</i>	6
1.6.1.- <i>Polimerización por Etapas o Condensación</i>	6
1.6.2.- <i>Polimerización por Adición</i>	7
1.7.- DE ACUERDO A LA TÉCNICA DE SÍNTESIS	9
1.7.1.- <i>Polimerización en masa</i>	9
1.7.2.- <i>Polimerización en solución</i>	9
1.7.3.- <i>Polimerización por suspensión inversa</i>	10
2.1.- DE ACUERDO AL TIPO ENTRECRUZAMIENTO	12
2.1.1.- <i>Hidrogeles químicamente entrecruzados</i>	12
2.1.2.- <i>Hidrogeles físicamente entrecruzados</i>	12
2.2.- DE ACUERDO AL GRADO DE HINCHAMIENTO.....	13
2.2.1.- <i>Hidrogeles de hinchamiento moderado</i>	13
2.2.2.- <i>Hidrogeles de hinchamiento alto o Polímeros Superabsorbentes (SAP)</i>	13
2.4.- DE ACUERDO A SU CARGA	14
2.4.1.- <i>Hidrogeles no iónicos</i>	14
2.4.2.- <i>Hidrogeles iónicos</i>	14
2.4.3.- <i>Hidrogeles amfotéricos</i>	14
2.4.4.- <i>Hidrogeles Zwitteriónicos</i>	14
3.- HIDROGELES. CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS.....	15
3.1. - <i>Propiedades mecánicas</i>	15
3.2.- <i>Agua libre y agua ligada total</i>	15

3.3.- Radios de hinchamiento	16
3.4.- Propiedades ópticas.....	17
3.5.- Biocompatibilidad.....	18
4.- APLICACIONES	18
4.1.- HIDROGELES SUPERABSORBENTES (SAP) EN LA AGRICULTURA.....	18
4.1.1.- Acondicionadores del suelo/fertilizantes de liberación lenta	19
4.1.2.- Materiales de revestimiento de fertilizantes encapsulados	20
4.1.3.- Removedores de iones metálicos en suelos contaminados	21
4.2.- APLICACIONES DE LOS HIDROGELES EN OTRAS ÁREAS	22
4.2.1.- Biosensores.....	22
4.2.2.- Lentes de contacto.....	22
4.2.3.- Andamios de tejidos humanos.....	23
4.2.4.- Nieve artificial.....	23
4.2.5.- Construcción. Materiales Compuestos Superabsorbentes.....	24
5.1.- DE ACUERDO A LA VELOCIDAD DE LIBERACIÓN	26
5.1.1.- Fertilizantes de liberación rápida o QRF	26
5.1.2.- Fertilizantes de liberación lenta o SRF	26
5.1.3 Liberación controlada	27
5.2.- DE ACUERDO A LA FORMULACIÓN	27
5.2.1.- Fertilizantes encapsulados.....	27
5.2.2.- Fertilizantes Degradables	27
5.2.3.- Fertilizantes de Matriz Polimérica	28
5.2.3.1.- Método de carga "In situ"	28
5.2.3.2.- Método de carga por hinchamiento y secado	28
6.- TÉCNICAS EMPLEADAS PARA RETARDAR LA LIBERACIÓN DEL COMPUESTO EN LOS HIDROGELES.....	29
6.1.- Interacción física.....	29
6.2.- Interacción química o covalente.....	29
7. SUELOS EN LA AGRICULTURA	30
7.1.- Suelos Arcillosos.....	30
7.2.- Suelos Limosos	30
7.3.- Suelos Arenosos	30
7.4.- Humus.....	31
8.- TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN	31
8.1.- Calorimetría de Barrido Diferencial (DSC).....	31
8.2.- Análisis Térmico Diferencial (DTA).....	31
8.3.- Espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FT-IR)	32
IV. OBJETIVOS	38
V. HIPÓTESIS	38
VI. PARTE EXPERIMENTAL.....	39
1.1.- Materiales Generales Empleados	39
1.3.- Carga de fertilizante en la matriz polimérica	40

1.4.- Estudio del desarrollo de la planta	41
2.-HIDROGELES	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.41
2.1 Características físicas y mecánicas	44
2.2- Caracterización por calorimetría de barrido diferencial (DSC)	46
2.3.- Caracterización por Espectroscopia Infrarroja (FT-IR)	48
3.- CARGA DEL FERTILIZANTE EN LA MATRIZ POLIMÉRICA	49
3.1 Determinación del radio hinchamiento (%H)	49
3.2.- Determinación del porcentaje de carga (%C)	51
4.- ESTUDIO DEL DESARROLLO DE LA PLANTA DE PIMIENTO DULCE “CAPSICUM FRUTESCENS”	53
4.1.- Variación de la altura de la altura del tallo	53
4.2.- Variación del ancho de hoja	55
5.- ANÁLISIS GLOBAL DEL DESARROLLO DE LA PLANTA	56
5.1.- Análisis Cualitativo	56
5.2.- Análisis cualitativo	57
CONCLUSIONES.....	66
BIBLIOGRAFIA	

www.bdigital.ula.ve

Introducción

Una de las limitantes de la agricultura es que el tipo de suelo debe presentar una serie de cualidades físicas y químicas para ser aptos para el desarrollo agrícola por lo que vastas extensiones de suelos quedan inutilizables para la producción de alimentos. Esto por lo general se supera mediante la sobreexplotación de recursos naturales como los recursos del agua y un excesivo uso de fertilizantes y pesticidas (Bhat, Suleiman y Abdal, 2009). Aunque esta práctica da lugar a un considerable aumento del rendimiento de los cultivos a corto plazo, no es sostenible en el largo plazo. (Ekebafé, Ogbeifun y Okieimen, 2011)

Por otra parte, el agua en la agricultura es de vital importancia ya que es el medio portador de nutrientes hacia las plantas por lo que niveles adecuados de humedad son esenciales para la hidratación y mantenimiento del cultivo. Otro problema es que, en la mayoría de los terrenos ubicados en tierras secas, existe una escasez de agua específicamente en las estaciones secas, mientras que no pueden aprovecharse la abundancia de agua en las estaciones lluviosas debido a la falta de habilidades administrativas o recursos.

El empleo de materiales poliméricos en la agricultura, específicamente un tipo especial los hidrogeles, desempeñan el papel de reservorios de agua en el suelo además de ser acondicionadores del mismo permitiendo mejorar la permeabilidad, aireación y disminuyendo la compactación del suelo entre otras propiedades físicas (El Rehim, Hegazy, Mohdy, 2004). Los hidrogeles también se pueden emplear como agentes portadores de fertilizantes liberándolos gradualmente en el tiempo idealmente conforme a la demanda de nutrientes por parte de las raíces de los cultivos (Milani, França, Balieiro y Faez, 2017). Lo anterior es de vital importancia especialmente para suelos en donde por características de su composición y estructura son poco aptos para la agricultura ya que estos son pobres para el mantenimiento de humedad y de nutrientes. Lo anterior conllevaría a una reducción significativa en el uso de fertilizantes de aplicación directa; estudios indican que el 40–70% de nitrógeno, 80–90% de fósforo y 50–70% del potasio contenido en los fertilizantes convencionales se pierden por infiltración o volatilización sin ser absorbido por las plantas, causando un considerable daño al ecosistema (Ni, Liu y Lü, 2009).

En la aplicación de las matrices poliméricas como liberadoras de fertilizantes, estas se caracterizan porque el componente activo se dispersa en la matriz, a diferencia de los fertilizantes en donde el componente activo (por lo general urea) es encapsulado. Los fertilizantes encapsulados de liberación lenta son los que presentan un mayor crecimiento entre los fertilizantes manufacturados, su uso está limitado por el alto costo y además a factores de impacto poco discernibles en liberación de nutrientes. (Shavit, Shaviv, Shalit y Zaslavsky, 1997)

En cambio, los hidrogeles se pueden sintetizar a partir de materiales muchos más accesibles y permitiendo un mayor rango de selección de los mismos, que al igual que su fácil adaptabilidad como fertilizante de liberación lenta permite que sea mucho más viable económicamente para su aplicación en la agricultura medianamente o poco aptos para la producción agrícola.

A pesar que se encuentran numerosos estudios sobre la aplicación de los hidrogeles en la agricultura, éstos están en su mayoría relacionados con el papel que juega el agua en el mantenimiento en los suelos de baja retención, y en la respectiva mejora en la hidratación, haciendo énfasis en el efecto beneficioso en el desarrollo del cultivo.

No obstante, en la literatura son escasos los estudios en referencia a la aplicación de este tipo de matrices poliméricas para la liberación lenta de fertilizantes siendo un campo novedoso y en fase inicial de investigación. (Ding et al. 2016)

Los materiales poliméricos con mayor empleo en la agricultura desde hace décadas (como acondicionadores del suelo) son los que se derivan de las sales del ácido acrílico y la acrilamida por lo que existe una investigación extensa en la literatura en cuanto a las propiedades fisicoquímicas y mecánicas en su forma de gel. (Ahmed, 2015)

Los suelos de San Juan de Lagunillas, capital del Municipio Sucre, Edo. Mérida, se caracterizan por ser de un color amarillo-rojizo pobre en materia orgánica y nutrientes esenciales, principalmente nitrógeno (Baligar, Fageria, Eswaran, Wilson y Zhenli, 2004), limitantes para el desarrollo de especies hortícolas, en general. Además, la textura de este tipo de suelo se caracteriza porque al secar presenta una compactación alta por lo que tiene

una tendencia a ser poco permeable aumentando la escorrentía y erosión; además dejando poco espacio para el aire y el agua, que son esenciales para el crecimiento de las plantas. (Baligar et al. 2004)

El clima cálido pero moderado de San Juan de Lagunillas es ideal para el cultivo de ciertas especies hortícolas de gran importancia como la cebolla y las diferentes clases de pimientos. (Ramos, 1999)

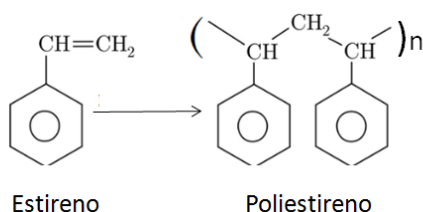
De esta forma, el presente estudio se enfoca en la creación de un tipo de fertilizante de liberación lenta empleando una matriz polimérica aniónica superabsorbente (hidrogel), la cual portará un fertilizante soluble NPK (nutrientes esenciales) para el desarrollo de un cultivo de pimiento dulce de la especie *Capsicum frutescens*. Se estudiará la supervivencia del cultivo en la tierra estéril arcillosa como una medida de la efectividad del dispositivo creado.

www.bdigital.ula.ve

Marco Teórico

1.- Polímeros, Polimerización y Funcionalidad

La palabra polímero se deriva de la palabra griega *Poly* que significa "muchos" y *Meros* que significa "partes o segmentos". Por lo tanto, un polímero es una molécula grande (macromolécula) formada por la repetición de pequeñas unidades químicas. Para ilustrar ésto, la representación 1.1 muestra la formación del polímero de poliestireno.



Este polímero está constituido por miles de unidades químicas las cuales están unidas entre sí, el cual representa la molécula de poliestireno, en donde n es el número de unidades que se repiten. La molécula de estireno representa el monómero a partir del cual se forma el polímero, y se caracteriza porque contiene un doble enlace que permite la unión de moléculas iguales (para este caso) o semejantes bajo ciertas condiciones de reacción. El residuo del polímero se denomina unidad estructural. La unidad estructural y la unidad de repetición son las mismas para este caso porque el polímero se forma a partir de un único tipo de monómero. (Ebewe, 2000)

La polimerización se produce por las reacciones secuenciales de los monómeros, que significa que se produce una serie sucesiva de reacciones a medida que las unidades de repetición se unen entre sí. Esto puede proceder por la reacción de los monómeros para formar un dímero, que a su vez reacciona con otro monómero para formar un trímero y así sucesivamente. La reacción también puede ser entre dímeros, trímeros o cualquier especie molecular dentro de la reacción, para formar una molécula progresivamente más grande. En cualquier caso, una serie de uniones se construye entre las unidades de repetición, y la molécula de polímero resultante a menudo se llama cadena de polímero, una descripción que destaca su similitud física con los eslabones de una cadena. (Ebewe, 2000)

La funcionalidad de una molécula es simplemente su capacidad de enlazarse entre ella o el número de sitios que tiene disponible para enlazarse con otras moléculas bajo condiciones específicas de polimerización. De esta forma una molécula puede clasificarse como monofuncional, bifuncional, o polifuncional dependiendo de si tiene uno, dos, o más de dos sitios disponibles para enlazarse con otras moléculas. (Ebewe, 2000)

1.1.- De acuerdo a su origen

1.1.1.- Polímeros Naturales

Los polímeros naturales son las principales formas de biomasa renovable, que proviene de la materia macromolecular orgánica de los animales, plantas y microbios. Incluyen polisacáridos (como celulosa, quitina / quitosano, almidón y ácidos hialurónicos), proteínas (proteínas de plantas como la soya, proteínas animales como la seda natural y diferentes enzimas), lignina, caucho natural y poliésteres naturales. Estos materiales no dañan el medio ambiente, ya que los microbios presentes en el suelo pueden degradar los materiales de polímeros naturales desechados de forma fácil e inocua. (Sempeho, Kim, Mobofu y Hilonga, 2014)

1.1.2.- Polímeros Sintéticos

Éstos abarcan todos los materiales que son de origen petroquímico o completamente artificial. La mayoría de los polímeros que se han empleado en la industria corresponde a este tipo de material ya que pueden ser diseñados para que abarquen un mayor rango de propiedades fisicoquímicas y mecánicas que sus contrapartes naturales. Los polímeros que mayormente se emplea en la industria o como aplicaciones en la agricultura son los basados en acrilamida y las correspondientes sales del ácido acrílico. (Ahmed, 2013)

1.2.- De acuerdo a su forma

1.2.1.- Polímeros Lineales

Los polímeros lineales se forman a partir de monómeros bifuncionales por lo que la estructura del polímero resultante es lineal. (Ebewe, 2000)

1.2.2.- Polímeros Ramificados

Los polímeros ramificados se forman a partir de monómeros polifuncionales, en donde los lados crecientes (laterales) de la cadena polimérica principal en formación se terminan antes que tengan oportunidad de unirse a otras cadenas poliméricas. El polímero resultante se dice que es ramificado (Ebewe, 2000). También los polímeros ramificados se pueden formar a partir de polímeros lineales mediante la técnica de injerto sobre soporte.

1.2.3.- Polímeros Entrecruzados

Los polímeros entrecruzados se forman a partir de monómeros polifuncionales, en donde los lados crecientes de cada cadena polimérica se unen a otras cadenas poliméricas resultando en un sistema entrecruzado (Ebewe, 2000). Estos también se pueden formar a partir de polímeros lineales con el empleo de un agente entrecruzante.

1.3.- De acuerdo a su estructura

1.3.1.- Polímeros Cristalinos

Los polímeros cristalinos se originan porque durante el proceso de cristalización las cadenas poliméricas individuales se doblan y empaquetan regularmente de manera ordenada presentando un espaciado molecular estrecho y altas fuerzas de unión intermoleculares. En la región cristalina, la columna vertebral principal de la cadena molecular se ondula de un lado a otro de manera que el grosor de la región cristalina es aproximadamente de 100 Å. con unas dimensiones de longitud que pueden extenderse entre 1,000 a 10,000 Å por lo que la región cristalina presenta forma laminar. (Ebewe, 2000)

1.3.2.- Polímeros Semicristalinos

Los polímeros semicristalinos se caracterizan porque las regiones cristalinas están rodeadas por regiones amorfas en donde la fracción cristalina varía, por lo general, entre el 10- 50 %. En la macroescala un polímero semicristalino, por lo general, tiene una mayor resistencia, rigidez y densidad que de un polímero amorfo comparable. (Ebewe, 2000)

1.3.3.- Polímeros Amorfos

La estructura molecular de los polímeros amorfos se caracteriza porque las cadenas poliméricas individuales están orientadas de maneras aleatorias y enredadas entre sí, sin un patrón discernible. Estos polímeros vitrifican, formando un sólido vítreo amorfo. (Ebewele, 2000)

1.4.- De acuerdo a su composición

1.4.1.- Homopolímeros

Los homopolímeros están constituidos por un solo tipo de monómero a lo largo de toda su estructura. Por ejemplo: poliacrilamida, poliacetileno y polietileno, entre otros. (Márquez, 2016)

1.5.2.- Copolímeros

Están constituidos por dos o más unidades químicas repetitivas diferentes en la molécula del polímero. Cuando no se especifica la información sobre la secuencia de unidades repetitivas en el copolímero, se usa el término conectivo "co" en el formato general poli (A-co-B), donde A y B son los nombres de los dos monómeros. En un copolímero no especificado de estireno y metacrilato de metilo se llamaría poli [estireno-co- (metacrilato de metilo)] (Seymour y Carraher, 2003)

Las unidades de repetición en la cadena de copolímero pueden estar dispuestas en varios grados de orden a lo largo de la cadena principal; incluso es posible que la cadena principal tenga ramificaciones de otro tipo. De acuerdo a Ebewele, 2000; existen varios tipos de sistemas de copolímero

- Copolímero aleatorio: las unidades químicas repetitivas diferentes, representadas por A y B, están dispuestas al azar en las cadenas poliméricas:
- Copolímero alternante: hay una disposición ordenada, pero de forma alternada de las unidades químicas que se repiten a lo largo de la cadena de polímero:

- Copolímero de bloques: la cadena consiste en secuencias relativamente largas (bloques) de cada unidad repetitiva químicamente unidos entre sí:
- Copolímero de injerto: este se caracteriza porque cadenas poliméricas constituidas, por lo general, por monómeros de naturaleza distinta (B) se “injertan” o se enlazan covalentemente a la cadena principal:

1.5.- De acuerdo a su aplicación industrial

1.5.1.- Polímeros de Fibras

Las fibras están constituidas por polímeros lineales que presentan moléculas de estructura regular lo que origina un alto grado de simetría y alineación intermolecular. Además, la presencia de grupos polares en las moléculas le confiere altas fuerzas de unión intermoleculares. Por lo tanto, las fibras se caracterizan por presentar un alto módulo, alta resistencia a la fuerza y extensibilidades moderadas generalmente menos del 20%. (Ebewe, 2000)

1.5.2.- Polímeros Elásticos

Los elastómeros presentan moléculas con estructura irregular lo que origina débiles fuerzas intermoleculares

Los elastómeros están constituidos por moléculas con estructura irregular por lo que presentan débiles fuerzas intermoleculares y segmentos de cadena muy flexibles. No obstante, la alta flexibilidad está restringida por la introducción de algunos enlaces entrecruzados en su estructura. En ausencia de tensión aplicada, las moléculas de elastómeros generalmente asumen formas enrolladas. En consecuencia, los elastómeros exhiben alta extensibilidad (hasta 1000%), de la cual se recuperan rápidamente al eliminar la fuerza aplicada. Los elastómeros generalmente tienen bajo módulo de tensión inicial, pero cuando se estiran se vuelven rígidos. (Ebewe, 2000)

1.5.3.- Polímeros Plásticos

Los plásticos se caracterizan por presentar una estructura molecular intermedia entre las fibras y los elastómeros (Ebewele et al. 2000). Estos se pueden dividir en:

a. Polímeros Termoplásticos

Los polímeros termoplásticos, están constituidos por cadenas poliméricas lineales y ramificadas que, al no presentar enlaces entre ellas, les permiten deslizarse bajo la acción del calor sin sufrir ninguna ruptura estructural o cambio químico. Esto hace posible que se puedan ablandar y fluir bajo condiciones de calor y la presión, pudiéndose amoldar repetidas veces empleando ciclos de calentamiento y enfriamiento, similar a la cera de una vela, por lo que se denominan termoplásticos. Ejemplos de polímeros termoplásticos son polietileno, poliestireno y nylon. (Ebewele, 2000)

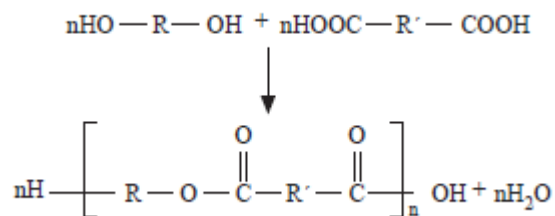
b. Polímeros Termoestables

Los polímeros termoestables se presentan inicialmente como oligómeros en estado líquido que al polimerizar pueden ser moldeados no obstante una vez en estado sólido no soportan ciclos de calentamiento- enfriamiento sin modificar su estructura molecular. Esto es debido a que una vez que polimeriza el material, se obtiene un sistema entrecruzado en donde las cadenas de polímeros están unidas químicamente. Ejemplos de polímeros termoestables incluyen urea-formaldehído, fenolformaldehído y epóxidos. (Ebewele, 2000)

1.6.- De acuerdo al mecanismo de síntesis

1.6.1.- Polimerización por Etapas o Condensación

La mayoría de las polimerizaciones de crecimiento por etapas, involucran una reacción de condensación clásica como la esterificación, el intercambio de ésteres o amidización., que suele estar acompañada por la eliminación de una pequeña molécula, como el agua, amoníaco, como un subproducto. Un típico mecanismo de crecimiento por etapas o condensación es la formación de un poliéster a través de la reacción de un glicol y un ácido dicarboxílico, como se muestra a continuación:



Donde R' y R son la parte no reactiva de las moléculas (Ebewe, 2000), de esta forma la polimerización por condensación normalmente emplea dos tipos de monómeros difuncionales que son capaces de sufrir reacciones orgánicas típicas. La forma de crecimiento de la cadena se caracteriza porque las especies monoméricas se convierten primero a dímeros, trímeros, tetrámeros y luego se unen entre sí para formar una cadena más larga, la cual a su vez se une a otras cadenas hasta resultar en un polímero de peso molecular moderado. (Harris, 1981)

1.6.2.- Polimerización por Adición

La polimerización por adición o en cadena consiste en la adición sucesiva, por lo general, de monómeros olefínicos a una cadena polimérica con un centro activo radical o iónico en rápido crecimiento, como se ejemplifica por la siguiente reacción de un monómero de vinilo generalizado.



La polimerización por reacción en cadena se induce mediante la adición de formadores de radicales libres, reactivos o por iniciadores iónicos. Independientemente del carácter del centro activo, la polimerización por reacción en cadena, como todas las reacciones en cadena, consta de tres pasos fundamentales. Estos son iniciación, lo que implica la adquisición del sitio activo por el monómero; propagación, que es la rápida y progresiva adición de monómero a la cadena en crecimiento, sin cambio en el número de centros activos; y terminación, lo que implica la destrucción del centro activo (Ebewe, 2000)

El mecanismo de polimerización por adición de un monómero en particular va a depender de la naturaleza química y de los grupos sustituyentes del mismo. Los monómeros con un grupo de extracción de electrones pueden proceder por una vía aniónica; aquellos con un grupo donador de electrones por una vía catiónica. Algunos monómeros con un grupo sustituyente estabilizado por resonancia, por ejemplo, el estireno, se puede polimerizar por más de un mecanismo. (Ebewele, 2000)

a. Vía Radicales Libres

La polimerización por radicales libres es iniciada por ruptura homolíticamediante termólisis o por un iniciador químico, sobre el doble enlace de una monómero olefínico con la respectiva formación de una especie radical (número impar de electrones), que es la especie propagadora.

b. Catiónica

La polimerización de adición catiónica puede ser iniciada por un reactivo electrófilo que abra heterolíticamente el doble enlace monomérico y forme un catión trivalente carbenio como especie activa propagador. (Horta, 1994)

c. Aniónica

La polimerización de adición aniónica se produce por la apertura heterolítica del doble enlace monomérico, provocada por el ataque de un reactivo nucleófilo que genera un ion negativo o carbanión. (Horta, 1994)

La disociación iónica tiene, sin embargo, un carácter diferente en ambos mecanismos. En la reacción catiónica, el contraión es un anión voluminoso, mientras en la aniónica suele ser un catión alcalino pequeño y muy solvatable. (Horta, 1994)

d. Vía Complejos de Coordinación

Con el nombre de polimerización por coordinación se conoce un mecanismo de adición que esta iniciado por catalizadores organometálicos de metales de transición. Estos

catalizadores funcionan formando complejos de coordinación entre el catalizador, el monómero, y la cadena polimérica en crecimiento; de ahí el nombre del mecanismo. Gracias a este mecanismo es posible obtener polímeros altamente estereoregulares, polymerizar α -olefinas, que no polymerizan por otros mecanismos y obtener polietileno lineal altamente cristalino. (Horta, 1994)

1.7.- De acuerdo a la técnica de síntesis

1.7.1.- Polimerización en masa

La polimerización en masa es la técnica más simple que implica como reactivos de partida solo los monómeros y los iniciadores solubles en los mismos. La alta tasa de polimerización y grado de polimerización se producen debido a la alta concentración de monómero. Sin embargo, la viscosidad de la reacción aumenta notablemente con la conversión generando gran cantidad de calor durante la polimerización. Al final de la reacción se obtiene una masa (casi) sólida como producto polimérico. La polimerización en masa se emplea ampliamente en la fabricación de polímeros de condensación, donde las reacciones son solo ligeramente exotérmicas y la viscosidad es por lo general baja por lo tanto mejora la mezcla, la transferencia de calor y la eliminación de burbujas. (Ahmed, 2015)

1.7.2.- Polimerización en solución

Este es uno de los métodos de síntesis de hidrogeles más utilizados. Monómeros tales como ácido acrílico, acrilamida, ácido metacrílico y metileno-acrilamidas puede disolverse en un solvente y polimerizarse usando iniciadores apropiados en una determinada temperatura. La presencia de solvente que sirve como disipador de calor es la principal ventaja de la polimerización en solución sobre la polimerización en masa. Los disolventes típicos utilizados para la polimerización en solución incluyen agua, etanol, mezclas de agua con etanol y alcohol bencílico. El producto obtenido por este método suele ser espeso, viscoso y de masa gomosa, lo que dificulta su manejo siendo una de los principales factores limitantes del método. (Rudzinski et al. 2002).

1.7.3.- Polimerización por suspensión inversa

La polimerización por suspensión o dispersión es un método ventajoso ya que los productos se obtienen en polvo o microesferas (perlas) y, por lo tanto, no se requiere molienda. Ya que la disolución seleccionada es agua en aceite “W/O” (water in oil) en lugar del más común aceite en agua “O/W” (oil in water), esta polimerización se le conoce como por polimerización por suspensión inversa. (Ahmed, 2015).

En este método, una solución acuosa del monómero es suspendida en una fase orgánica, como ciclohexano, hexano; formando gotitas finas de monómero, que son estabilizadas por la adición de agente tensioactivo, y luego se agregan iniciadores por radicales libres para polimerizar la mezcla. Usando este método, se puede controlar el tamaño y la forma precisa del polímero por una selección juiciosa de los surfactantes. Sin embargo, la elección de la adecuada de los surfactantes, del equilibrio hidrofílico-lipofílico, y las fases de hidrocarburos son algunos de los factores más importantes a considerar al sintetizar el producto formulado. Aquí, la necesidad de evaporar la fase orgánica se suma al costo del proceso (Rudzinski et al. 2002).

La suspensión inversa es una técnica altamente flexible y versátil. Produce hidrogeles con alta capacidad de hinchamiento y rapidez cinética de absorción (Hong, et al. 2010). Un iniciador soluble en agua muestra una mejor eficiencia que el tipo soluble en aceite. Cuando el iniciador se disuelve en la fase dispersa (acuosa), cada partícula contiene todas las especies reactivas y por lo tanto se comporta como un reactor aislado de polimerización de micro polímeros (Turakhiya et al. 2013). Este método se emplea para preparar hidrogeles esféricos, micropartículas con rango de tamaño de 1 μm a 1 mm. La polimerización es iniciada por radicales libres por descomposición térmica del iniciador. (Ahmed, 2015).

El proceso de suspensión inversa muestra ventajas adicionales en comparación con el método de solución. Estas son permiten un mejor control de la reacción de eliminación de calor, regulación de la distribución del tamaño de partícula, y otras posibilidades como ajuste de la estructura de la partícula o alteración de la morfología. En la polimerización por

suspensión, la solución de monómero se dispersa en un disolvente orgánico formando gotitas finas de monómero, que son estabilizadas por la adición de agente estabilizador. (Ahmed, 2015).

Recientemente, la técnica de suspensión inversa ha sido ampliamente empleada para formar hidrogeles a base de poliacrilamida debido a su fácil eliminación y manejo de los residuos peligrosos de acrilamida.

2.- Hidrogeles

Los hidrogeles son polímeros entrecruzados con un grupo hidrófilo que tiene la capacidad de absorber grandes cantidades de agua sin disolver en la misma. La capacidad de absorción de agua surge de los grupos funcionales hidrofílicos unidos a la cadena principal del polímero mientras que su resistencia a la disolución es debida a la red de entrecruzamientos entre las cadenas poliméricas. (Ahmed, 2015).

El entrecruzamiento ya sea física o químicamente, proporciona al hidrogel una estructura de red tridimensional, lo que la hace insoluble. Esta estructura reticulada insoluble permite la inmovilización y liberación efectiva de agentes activos y biomoléculas. Los hidrogeles parecen similares a los tejidos blandos naturales debido a su alto contenido de agua. (Maitra y Shukla, 2014)

Se sintetizan por reacción en cadena (adición) o por etapas (condensación). Polímeros sintéticos o naturales, homopolímeros o copolímeros, se utilizan para hacer redes tridimensionales por enredos moleculares o por reticulación química (Chung, et al. 2009) Dependiendo de las propiedades del polímero (polímeros) empleados, así como sobre la naturaleza y densidad de las uniones de red, tales estructuras en un equilibrio pueden contener varias cantidades de agua. Por lo general, en el estado hinchado, cantidad de agua en un hidrogel es mucho más alta que la fracción de masa de polímero (Ahmed, 2015)

Clásicamente, los hidrogeles se han utilizado para administrar medicamentos hidrófilos de molécula pequeña que tienen alta solubilidad tanto en la matriz del hidrogel como en el disolvente acuoso que hincha al hidrogel. En este caso, es relativamente sencillo cargar una

gran cantidad de medicamento en un hidrogel hinchado por partición simple de una solución acuosa concentrada de fármaco y posteriormente liberar el fármaco hidrófilo en un ambiente acuoso. (Hoare y Kohane, 2008)

2.1- De acuerdo al tipo entrecruzamiento

2.1.1.- Hidrogeles químicamente entrecruzados

Los geles químicamente reticulados, los enlaces covalentes están presentes entre diferentes cadenas de polímeros. La reticulación química resulta en una red con una relativa alta resistencia mecánica, mayor estabilidad y dependiendo de la naturaleza del producto tiempos de degradación relativamente largos. (Ebara, 2014)

Los hidrogeles reticulados químicos se producen mediante injerto de monómeros funcionales en la red de polímeros o utilizando un reticulante para acoplar las dos cadenas de polímeros. Los mecanismos de reacción se basan en la formación de enlaces covalentes mediante grupos funcionales como COOH, -OH o -NH₂, entre otros, con reactivos de reticulación siendo los más comunes los compuestos bifuncionales simétricos con grupos reactivos con especificidad para grupos funcionales presentes en las macromoléculas de la matriz (Maitra y Shukla, 2014)

Los geles químicamente reticulados se pueden obtener por polimerización de adición vía radicales libres a partir de monómeros de bajo peso molecular en presencia de un agente de reticulación. Uno de los métodos más utilizados para la preparación de los hidrogeles basados en NIP-AAm son una polimerización redox que utiliza persulfato de amonio (APS) como iniciador y tetrametiletilendiamina (TEMED) como un catalizador. TEMED acelera la tasa de formación de radicales libres del persulfato, y estos a su vez catalizan la polimerización. (Ebara et al. 2014)

2.1.2.- Hidrogeles físicamente entrecruzados

La reticulación física se realiza mediante interacciones distintas del enlace covalente. Las reticulaciones físicas incluyen cadenas enredadas, enlaces de hidrógeno, interacción hidrófoba y formación de cristales. Estas reticulaciones físicas pueden no ser de naturaleza

permanente, pero son suficientes para hacer que los hidrogeles sean insolubles en un medio acuoso. Los enlaces cruzados físicos pueden ser disociados reversiblemente bajo estímulos específicos como el calentamiento/enfriamiento, siendo la reticulación física reversible. (Maitra y Shukla, 2014)

2.2.- De acuerdo al grado de hinchamiento

2.2.1.- Hidrogeles de hinchamiento moderado

Son los hidrogeles que tienen la capacidad de retener agua en un orden considerablemente menor a 10 g/g (10 g/g de hidrogel)

2.2.2.- Hidrogeles de hinchamiento alto o Polímeros Superabsorbentes (SAP)

Los polímeros superabsorbentes o SAP (Superabsorbent Polymer) es un hidrogel ligeramente entrecruzado, el cual puede absorber y retener una gran cantidad de agua en el orden de 10 a 1000 g/g (1.000% - 100.000%) de agua por peso de hidrogel. (Zohuriaan, Omidian y Kabiri, 2010)

2.3.- De acuerdo a su respuesta a estímulos ambientales

2.3.1.- Hidrogeles convencionales

Se caracterizan porque el equilibrio hinchamiento no se ve alterado por cambios en las condiciones ambientales tales como la temperatura, el pH y fuerza iónica. (Milani et al. 2017)

2.3.2.- Hidrogeles inteligentes

Se caracterizan porque el equilibrio de hinchamiento se modifica con cambios mínimos en las condiciones ambientales que dependen de factores físicos, químicos o biológicos. Este comportamiento del hidrogel como un sensor también se le denomina Hidrogel de Respuesta a Estímulo (Stimulus Responsive Hydrogel). Las innumerables aplicaciones de los hidrogeles en diversos campos se deben a la gran variedad de estímulos físicos,

químicos y biológicos a los que puede responder. Los estímulos físicos incluyen temperatura, campos eléctricos, composición del solvente, luz, presión, sonido y campos magnéticos, mientras que los estímulos químicos o bioquímicos incluyen pH, iones y reconocimiento específico molecular a eventos. (Ebara et al. 2014)

2.4.- De acuerdo a su carga

De acuerdo a Ahmed (2015), se pueden clasificar de acuerdo a su carga:

2.4.1.- Hidrogeles no iónicos

Se caracterizan porque ninguno de sus componentes monoméricos presenta carga en solución acuosa.

2.4.2.- Hidrogeles iónicos

Se caracterizan por presentar grupos ionizables que pueden ser aniónicos o catiónicos. Los grupos aniónicos aumentan la hidrofiliidad del hidrogel, confiriéndole altos grados de hinchamiento como, por ejemplo, los polímeros superabsorbentes (SAP) que están constituidos al menos por un monómero iónico, por lo general, un grupo ácido aniónico.

2.4.3.- Hidrogeles anfotéricos

Presentan tantos grupos tanto ácidos como básicos en su estructura molecular como son los aminoácidos en las proteínas. Una de las aplicaciones de estos hidrogeles es la respuesta a los cambios de pH.

2.4.4.- Hidrogeles Zwitteriónicos

Estos abarcan, las polibetaínas y amfolitos, que contienen ambos grupos aniónicos y catiónicos en cada unidad repetitiva del polímero. Estos se emplean como hidrogeles inteligentes en áreas como la nanotecnología.

3.- Hidrogeles. Características fisicoquímicas

3.1. - Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas de los hidrogeles dependen de su composición y estructura. En términos generales, los hidrogeles son muy débiles, es decir, los geles son suaves y frágiles, y el gel no soporta grandes deformaciones. Esto se debe principalmente al hecho de que los polímeros están lejos de ser redes completamente interconectadas, conteniendo varias partes no homogéneas, tales como cadenas colgantes (secciones no entrecruzadas) y bucles (enredos). (Ebara et al. 2014)

Los geles químicos, obtenidos a través de la copolimerización de un monómero en presencia de un agente reticulante, también son mecánicamente débiles. Las propiedades mecánicas del hidrogel se ven afectadas por la composición del comonómero, densidad de reticulación, condiciones de polimerización y grado de hinchamiento. La resistencia mecánica del hidrogel a menudo se deriva completamente de los enlaces cruzados en el sistema, particularmente en el estado hinchado donde los enredos físicos son casi inexistentes. (Ebara et al. 2014)

Al cambiar el grado de reticulación, la propiedad mecánica deseada del hidrogel puede ser lograda, y al aumentar este grado se puede obtener un hidrogel más fuerte no obstante, este aumento en el grado de reticulación disminuye la flexibilidad de los hidrogeles creando una estructura más frágil. (Das, 2013)

3.2.- Agua libre y agua ligada total

Cuando un hidrogel seco comienza a absorber agua, las primeras moléculas de agua que entran a la matriz hidratarán a los grupos más polares e hidrófilos, lo que se denomina "agua primaria unida". A medida que los grupos polares se hidratan, la red se hincha y expone grupos hidrófobos, que también interactúan con las moléculas de agua, lo que lleva a obtener agua unida de una manera hidrofóbica o lo que se denomina "agua secundaria unida". Ambas se combinan a menudo y se denomina simplemente "agua ligada total". Después de que el agua ha interactuado con sitios tanto hidrófilos como hidrófobos, la

fuerza de conducción osmótica de las cadenas de la red permite que la red absorba más agua. Finalmente, el balance entre la fuerza de retracción y la dilución infinita establece el nivel de hinchamiento en equilibrio. El agua adicional absorbida más allá del límite total de agua se define como "agua libre". Hay varios métodos para estimar las cantidades relativas tanto de agua libre como de agua ligada total. (Hoffman, 2012)

3.3.- Radios de hinchamiento

El contenido de agua en el equilibrio de un hidrogel depende básicamente de la naturaleza del monómero o monómeros hidrófilos que lo forman, la densidad de entrecruzamiento y por otros factores como son, la temperatura, la fuerza iónica y el pH del medio de hidratación (Márquez, 2015)

Las características de hinchamiento son cruciales para el uso de hidrogeles en biomedicina y farmacéutica ya que la relación de hinchamiento de equilibrio afecta el coeficiente de difusión del soluto, humectabilidad de la superficie, movilidad, propiedades ópticas y mecánicas del hidrogel. Las propiedades de hinchamiento están determinadas por muchos factores, incluida el tipo de composición de los monómeros, densidad de reticulación y otras características del entorno como factores como la temperatura, el pH y la fuerza iónica. (Ebara et al. 2014)

El comportamiento de hinchamiento de los sistemas de hidrogel es un parámetro importante que rige sus aplicaciones específicamente en farmacéutica, oftalmología e ingeniería de tejidos. Las cadenas de polímero en un hidrogel interactúan con la molécula de disolvente y tienden a expandirse al estado totalmente solvatado, mientras que la estructura reticulada aplica una fuerza de retracción para tirar de las cadenas hacia adentro. El equilibrio se logra cuando las fuerzas de expansión y retracción se equilibran entre sí. El contenido de agua, viene dada por la ecuación:

Se usa generalmente para describir el comportamiento de expansión de los hidrogeles.

Radio de hinchamiento en el equilibrio = $W_{hinchado}/W_{seco}$

Se usa generalmente para describir el comportamiento de expansión de los hidrogeles, siendo $W_{hinchado}$ es el peso del gel hinchado, y W_{seco} es el peso del gel seco. (Ebara, 2014)

La cinética de expansión de los hidrogeles también se puede determinar a partir curvas cinéticas de expansión. Primero, se determina el peso del gel seco (W_0), luego se sumerge en una cantidad excesiva de agua hasta que el equilibrio de expansión sea alcanzado. El peso del gel húmedo (W_t) se determina después de la eliminación del agua superficial. El índice de hinchamiento se calcula con la siguiente ecuación:

$$\text{Porcentaje de hidratación en peso} = ((W_{hinchado} - W_{seco}) / W_{seco}) \times 100$$

3.4.- Propiedades ópticas

Dentro de las propiedades ópticas, se ha comprobado que el índice de refracción del hidrogel depende de la composición química del monómero o comonómeros que se utilicen en la síntesis, grado de hinchamiento y naturaleza del solvente. (Katime, I; Katime, O. y Katime D., 2003)

Cuando un hidrogel es heterogéneo aparecen regiones con diferente índice de refracción. Si la mezcla monomérica se polimeriza en presencia de una cantidad elevada de disolvente con bajo poder solvatante, se produce generalmente una separación de fases, dando como resultado un hidrogel heterogéneo con zonas de distinto índice de refracción y, por lo tanto, turbio. (Katime et al. 2003)

La composición química de los hidrogeles copoliméricos puede ser determinante para la homogeneidad de este y, por lo tanto, para poseer unas determinadas propiedades ópticas. Así mismo, un hidrogel inicialmente homogéneo puede convertirse en heterogéneo si se empobrece el poder solvatante del disolvente que lo hincha. Esto puede lograrse variando parámetros como, por ejemplo, la temperatura, el pH, la fuerza iónica o la composición del disolvente. (Katime et al. 2003)

3.5.- Biocompatibilidad

Los hidrogeles son materiales con gran potencial como biomateriales, ya que son apropiados para aplicaciones en medicina dada su buena interacción con los tejidos vivos, debido principalmente a su consistencia blanda, elástica, baja tensión superficial y su elevado contenido de agua. (Vashist, Guptay Ahmad, 2012)

La biocompatibilidad de un material se puede definir como la capacidad de éste para que, al entrar en contacto con los fluidos corporales y los tejidos, no cambien adversamente sus propiedades físicas, químicas, mecánicas y de superficie. Tampoco debe dañar los tejidos próximos, causar reacciones tóxicas, alérgicas ni tumorales, destruir enzimas y proteínas plasmáticas ni elementos de la sangre. (Katime et al. 2003)

La biocompatibilidad de un material o dispositivo implantado, es un proceso dinámico con dos vertientes que comprenden los efectos que provoca el organismo receptor en el material implantado y los efectos provocados por el material implantado (o de sus productos de degradación) en el organismo receptor. (Katime et al. 2003)

4.- Aplicaciones

4.1.- Hidrogeles Superabsorbentes (SAP) en la agricultura

Un importante punto en la agricultura es el suministro nutricional necesario a las plantas, que está desde los macronutrientes como N,P, K, Ca, Mg y S hasta los micronutrientes tales como B, Cl, Co, Cu Fe, Mn, Mo, Ni y Zn (Reetz et al. 2016). Estos nutrientes muy a menudo no están disponibles en el ambiente a suficientes niveles para el buen desarrollo de la planta. Así, los usos de agroquímicos son esenciales para la agricultura, como fertilizantes, herbicidas y pesticidas. (Milani et al. 2017). El desarrollo y uso de agroquímicos combinado con los materiales poliméricos han sido una fuente alternativa para este problema para suministrar los nutrientes necesarios a las plantas y sin causar contaminación (Puoci et al. 2008)

Tres principales clases de hidrogeles han sido empleados desde siempre como polímeros para la agricultura: (1) copolímeros de injerto de almidón obtenidos por polimerización de

injerto de poliacrilonitrilo sobre almidón seguido de saponificación de las unidades de acrilonitrilo (2) poliacrilatos entrecruzados (3) poliacrilamidas entrecruzadas y copolímeros de acrilamida-acrilato con mayor contenido de acrilamida. La mayoría de los hidrogeles comercializados en la agricultura vienen del último grupo por ser conocidos por mantenerse funcionales o activos por un tiempo mucho mayor. (Ekebafe et al. 2011)

4.1.1.- Acondicionadores del suelo/fertilizantes de liberación lenta

La presencia de agua en el suelo es esencial para la vegetación. El agua líquida asegura la alimentación de las plantas con elementos nutritivos, que hacen posible que las plantas obtengan una mejor tasa de crecimiento. La aparición de los hidrogeles superabsorbentes o SAP (Super Absorbent Polymers) como acondicionadores del suelo se remonta a la década de 1980 cuando se describieron las primeras patentes. Erickson patentó un método para mejorar la retención de agua y capacidad de aireación de los suelos mediante la inserción de esta clase de polímeros. (Milani et al. 2017)

En zonas áridas, el uso de SAP en el suelo arenoso (medio macroporoso), se emplea para aumentar la retención de agua siendo uno de los medios más significativos para mejorar la calidad de las plantas (Bakass et al. 2002). También se puede emplear para la liberación lenta de fertilizantes en el suelo.

Numerosos estudios han demostrado que los hidrogeles superabsorbentes pueden influir positivamente en la permeabilidad, densidad, estructura, textura, evaporación y reducir la infiltración del agua a través de los suelos. En particular, los hidrogeles reducen la frecuencia de riego y tendencia a la compactación, reducen la erosión y el escurrimiento de agua, aumentan la aireación del suelo y la actividad microbiana. (El-Rehrih et al. 2004)

En el mercado actual existen diferentes marcas de esta clase de hidrogeles superabsorbentes en aplicaciones para la agricultura. Una de ellas es la marca comercial Aquasorb clama que “a diferencia de la mayoría de los productos que se hidratan, Aquasorb tiene la propiedad de liberar fácilmente el agua absorbida y los nutrientes permitiendo la disposición de los mismos como función de la absorción de la planta”. Aquasorb se define como un polímero superabsorbente aniónico entrecruzado, siendo un copolímero de acrilamida y acrilato de

potasio. Mezclado en un sustrato, Aquasorb proporciona una reducción del estrés hídrico. Asegura que los esquejes y trasplantes, desarrollen las raíces mejor y que las plántulas crezcan más rápido. Las frecuencias de riego se extienden. Es ideal en sustratos para contenedores, plantas colgantes, y plantas de interior”. En la sección de mezclas con fertilizante clama que, para reducir pérdidas por filtración de fertilizantes, Aquasorb^R se puede mezclar en su estado seco con la solución de fertilizantes. Los resultados de prueba indican que el desarrollo de las raíces de la planta es más alto. Disminuyendo en el orden de 15-30% en la cantidad de fertilizante empleado. (Aquasorb^R, 2002)

4.1.2.- Materiales de revestimiento de fertilizantes encapsulados

Se denominan como materiales de polímero superabsorbente (MPS) que, en aplicación a la producción de fertilizantes de urea recubiertos, con carácter de liberación controlada, los hace multifuncionales y con propiedades mejoradas de retención de agua, lo que es muy beneficioso, especialmente en regiones con suministro limitado de agua.

Las preparaciones con membranas de liberación retardada, de gránulos de urea encapsulados con doble revestimiento; esto es, con una capa interna de almidón reticulado y una capa externa de ácido acrílico y acrilamida. En definitiva, la urea recubierta, obtenida de este modo, tiene almidón reticulado como capa de recubrimiento interior con un copolímero de ácido acrílico reticulado y acrilamida como recubrimiento externo.

En dicho MPS, se denota un mecanismo de liberación retardada, donde se implica la absorción de agua por el material de recubrimiento, haciendo que se hinche y se transforme en un hidrogel, con lo que la urea central se disuelve en el agua del hidrogel y se difunde lentamente, a través de un sistema similar a una rejilla del hidrogel hinchado, mediante la transferencia masiva de agua desde el hidrogel al agua en el suelo. El mecanismo de liberación mencionada es similar al que ocurre en un hidrogel puro. (Guo et. al 2005)

Finalmente, dentro de los MPS, se tienen los desarrollos de compuestos de urea de liberación lenta, con cubierta de triple polímero, siendo el recubrimiento interno de polietileno, que sirve, principalmente, como una película de liberación lenta; seguido, por una capa de recubrimiento intermedia, a base de poli (ácido acrílico-co-acrilamida), que

cumple funciones como una capa de retención de agua superabsorbente; y el recubrimiento más externo, compuesto por poli (metacrilato de butilo); cuya actividades de protección de la capa intermedia. Con dicho desarrollo, se pretende obtener una liberación lenta y evitar pérdidas de evaporación de agua, con el objetivo de disminuir la frecuencia de riego, mediante el uso de un fertilizante superabsorbente de liberación retardada y con carácter multifuncional. (Tao et al. 2011)

4.1.3.- Removedores de iones metálicos en suelos contaminados

El uso intensivo de agroquímicos en la agricultura ha resultado en prácticas abusivas con solo la finalidad de incrementar los beneficios y la productividad. Debido a esto, una enorme cantidad de agentes tóxicos contaminantes orgánicos e inorgánicos, especialmente los iones metálicos, son depositados a diario en el suelo, ríos, y fuentes de agua. Los iones metálicos vienen unidos a agroquímicos como lo son los fertilizantes y biocidas, generando la acumulación de los mismos en el medioambiente dado que no son degradables, siendo altamente tóxicos tanto para los humanos como animales a través del consumo del agua y los propios alimentos. (Milani et al. 2017)

Los polímeros han sido empleados como materiales absorbentes de elementos tóxicos. Los iones metálicos pueden ser absorbidos en la superficie del polímero por la afinidad química que pueden presentar con ciertos grupos funcionales. Los polisacáridos como la celulosa, quitina y quitosano son los grupos de polímeros (hidrogeles) que más frecuentemente se emplean para la absorción de metales (por enlace iónico) por sus grupos ionizables: ácido carboxílicos, hidroxilo, aminas y amida. No obstante, su empleo en terrenos cultivables tiene el problema que este tipo de material también afecta negativamente los micro y macronutrientes que están en el suelo para el desarrollo de los cultivos por lo que puede originar que las mismas absorben los iones metálicos por un proceso que se llama fitorremediación. Debido a esto son escasos los estudios en la literatura de esta aplicación en suelos cultivables y no se encontraron ejemplos de polímeros comerciales para esta aplicación. (Milani et al. 2017)

4.2.- Aplicaciones de los hidrogeles en otras áreas

4.2.1.- Biosensores

Los hidrogeles se utilizan en la preparación de biosensores, que actúan como soportes para la inmovilización de enzimas. Se han desarrollado diversos biosensores para la inmovilización de enzimas, uno de ellos es un amperómetro-sensor constituido por PEG oxidasa de glucosa modificada inmovilizada en una membrana de criogel de PVA. Este sensor permite la determinación de la glucosa electroquímicamente midiendo la producción de peróxido de hidrógeno como resultado de la reacción enzimática, que puede ser utilizada en la determinación de la glucosa sérica. También, un método biosensórico de determinación de fructosa ha sido desarrollado basado en la matriz de polímero de polietilenimina (PEI) e hidrogel de policarbamoilsulfonato utilizado para la inmovilización de la enzima D-fructosa deshidrogenasa. (Swarbrick, 2013)

4.2.2.- Lentes de contacto

Las lentes de contacto blandas son una de las aplicaciones más utilizadas de los hidrogeles. Una de las principales características es la comodidad, ya que el hidrogel se adapta perfectamente a la curvatura ocular global. También permiten que el oxígeno atmosférico llegue a la córnea disolviéndose en el agua del lente. (Swarbrick, 2013)

Los hidrogeles basados en PHEMA poli (2-hidroximetilmetacrilato) se utilizan ampliamente como lentes de contacto blandas debido a su excelente biocompatibilidad y propiedades mecánicas. Varias empresas desarrollaron posteriormente una gama de materiales de lentes de contacto de hidrogel que contienen varios monómeros como N-vinilpirrolidina (N-VP), metilmetacrilato (MAA), ácido metacrílico (MMA) y metacrilato de glicerilo, entre otros, que se incorporan para aumentar el contenido de agua en las lentes de contacto de hidrogel, en el intento de obtener materiales con propiedades mecánicas adecuadas, que les permiten resistir la fuerza del párpado junto con una permeabilidad elevada al oxígeno. (Swarbrick, 2013)

Las lentes de contacto medicadas están atrayendo un gran interés por el suministro de medicamentos oftálmicos, ya que aumentan significativamente el tiempo de residencia de la droga en el área precorneal debido a la geometría barrera proporcionada por las lentes de contacto al medicamento cuando se difunde desde la matriz del gel hacia la película lagrimal. (Swarbrick, 2013)

4.2.3.- Andamios de tejidos humanos

Los hidrogeles tienen una microarquitectura similar a la de la matriz extracelular natural (ECM, Extra Cellular Matrix) por lo tanto, estos se han utilizado para apoyar y ayudar a la restauración de una variedad de tejidos como los huesos, cartílago, nervios, vasos y piel. Los andamios actúan como plantillas artificiales tridimensionales en donde las cuales el tejido a reconstruir se cultiva sobre esta. La alta porosidad del hidrogel permite la difusión de las células durante la migración, así como la transferencia de nutrientes y productos de desecho lejos de membranas celulares (Swarbrick, 2013). Por ejemplo, los injertos de cultivo de tejidos recubiertos de colágeno se utilizan para el cultivo de implantes corneales tridimensionales (Pal et al. 2009)

Las espumas de polímero de poli (ácido láctico-co-glicólico) (PLGA) se siembran con preadipocitos para el cultivo de células epiteliales de la mama. Andamio poroso (por ejemplo, filtro, muestra de nylon, Transwell, microportador biodegradable) recubierto con colágeno fibrilar, idealmente se usa colágeno tipo III mezclado con fibronectina o con Matrigel para el cultivo de células hepáticas maduras normales (células hepáticas poliploidianas). Existe un interés creciente en el uso de hidrogeles en la regeneración del sistema nervioso central. El tubo PHEMA químicamente reticulado se creó empleando fuerza centrífuga durante la síntesis; el diámetro exterior de estos tubos es de 2,4 mm y el espesor de la pared es de 40-400 μm , que podría utilizarse para la regeneración guiada en el sistema nervioso (Pal, et al. 2009).

4.2.4.- Nieve artificial

La primera pista cubierta de nieve artificial que se construyó en el mundo, fue cerca de Tokio en 1991. La pista tiene una pendiente de 50 m de ancho y 120 m de largo. La nieve

artificial se prepara hinchando el hidrogel con una cantidad de agua 100 a 200 veces su masa y congelándolo “in situ”. La capa de gel congelada se trata para darle un aspecto real, similar al obtenido con la nieve en polvo, una vez obtenida se esparce hasta que la nieve alcance un espesor de 15 cm, una de las ventajas de emplear hidrogeles súper absorbentes para la construcción de pistas de nieve artificiales es que se puede mantener el edificio a temperaturas relativamente altas (alrededor de 15°C), mientras que con los sistemas convencionales esto no es posible, ya que en estos casos se necesita mantener el edificio a temperaturas menores de 5°C, mejorando de esta forma el confort de los esquiadores. (Katime et al. 2003)

4.2.5.- Construcción. Materiales Compuestos Superabsorbentes.

Desde hace poco tiempo se están utilizando los hidrogeles para fabricar materiales compuestos para su aplicación en la construcción. Básicamente este tipo de material se prepara mezclando un hidrogel superabsorbente con un elastómero. Este tipo de mezcla no es fácil de preparar debido a que el hidrogel tiene propiedades hidrófilas mientras que los elastómeros, en su mayoría, son hidrófobos. Para remediar esta dificultad es necesario modificar adecuadamente la interface de contacto de ambos componentes ya que una adhesión insuficiente en la interface puede originar una separación completa de ambos componentes con la consiguiente pérdida y propiedades mecánicas del material compuesto. (Katime et al. 2003)

Este tipo de material se está empleando en las uniones de los bloques de hormigón de los túneles que se encuentran bajo agua, de forma que cuando el material se hincha se sellan perfectamente los bloques y se impide la filtración de agua hacia el interior del túnel. Este tipo de material compuesto se está utilizando profusamente en la construcción de túneles de metro y autopistas de diversos países de Europa. Un ejemplo reciente es el caso del Euro túnel que une Inglaterra con el continente europeo. (Katime et al. 2003)

5.- Material fertilizante, Macronutrientes Primarios, Nutrientes Secundarios y Micronutrientes.

El término "material fertilizante" significa un fertilizante comercial que contiene uno o más de los nutrientes vegetales reconocidos, que se utilizan principalmente para la nutrición del cultivo. Los fertilizantes se derivan de una amplia variedad de productos naturales y materiales manufacturados, y se venden en forma sólida, líquida y gaseosa (amonio anhídrido). Estos materiales están diseñados para promover el crecimiento de las plantas o aumentar los niveles de nutrientes disponibles para las plantas en los suelos. (Savoy, 2010)

El análisis o grado de fertilizante certificado indicado en la etiqueta se refiere a las cantidades de cada elemento que está en el material (la cantidad mínima garantizada presente), basado en porcentaje en peso. Todos los fertilizantes están etiquetados con tres números que dan el porcentaje en peso de nitrógeno total (N), citrato de fósforo (expresado como P_2O_5) y potasio soluble en agua (expresado como K_2O), respectivamente. A menudo, para simplificar N- P_2O_5 - K_2O ., se dice que estos números representan nitrógeno, fósforo y potasio (NPK). (Savoy, 2010)

El nitrógeno (N), el fósforo (P) y el potasio (K) se conocen como macronutrientes primarios. Esto se debe a que primero son requeridos por la planta en grandes cantidades en relación con otros nutrientes y además son los nutrientes que muy a menudo limitan el crecimiento y desarrollo de las plantas en los sistemas de suelo. (Savoy, 2010)

Calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S) se denominan nutrientes secundarios porque son menos propensos a ser factores limitantes del crecimiento de plantas en los suelos. El calcio y el magnesio se agregan en materiales de abono cuando se ajusta el pH del suelo y el azufre se agrega continuamente por la lluvia y la liberación de la materia orgánica del suelo. Zinc (Zn), cloro (Cl), boro (B), molibdeno (Mo), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), cobalto (Co) y níquel (Ni) se denominan micronutrientes porque se encuentran en cantidades muy pequeñas en relación con otros nutrientes vegetales en la planta promedio y además es menos probable que sean factores limitantes de crecimiento y desarrollo de plantas en la mayoría de los suelos. (Savoy, 2010)

5.1.- De acuerdo a la velocidad de liberación

5.1.1.- Fertilizantes de liberación rápida o QRF

Los fertilizantes de liberación rápida o QRF (Quick Release Fertilizer) pertenece a la mayoría de los fertilizantes comercializados, por lo general, son de origen inorgánico (soluble en agua) y la urea, los cuales se caracterizan porque los nutrientes están disponibles inmediatamente una vez aplicado en el suelo donde se ubica el cultivo. Este tipo de fertilizante son los que usualmente se usa como fuente de nutrientes a las plantas. La limitante principal de los fertilizantes de liberación rápida es un porcentaje considerable se pierden por drenaje en el suelo o por volatilización. Además, este tipo de fertilizante no sincroniza con la demanda cambiante de nutrientes en el ciclo de desarrollo de las plantas, por lo que se hace necesario las aplicaciones sucesivas variando de acuerdo a su etapa. Ejemplos de esto tipos de fertilizantes son nitrato de amonio, fosfato de amonio y urea. (Liu et al. 2017)

5.1.2.- Fertilizantes de liberación lenta o SRF

La mayoría de los fertilizantes de liberación lenta o SRF (Slow Release Fertilizer), son los que corresponden a las sustancias o compuestos nitrogenados de baja solubilidad (N-low solubility compounds), por lo general de origen orgánico, que mediante descomposición biológica o química son liberados gradualmente en el suelo. Los compuestos de descomposición enzimática o biológica son consecuencia de la actividad microbiana, la cual depende a su vez de las condiciones del suelo y climáticas. Debido a esto, la tasa de liberación de los nutrientes es dependiente de factores ambientales no controlables, no obstante, permite un mejor aprovechamiento de los nutrientes por parte de las plantas en comparación a los fertilizantes de liberación rápida (Liu et al. 2017). Ejemplos de fertilizantes manufacturados es la urea-formaldehído (UF) de descomposición biológica, la urea-isobutilaldehído/isobutilideno-diurea (IBDU) y urea-acetaldehído/ciclodiuurea (CDU) de descomposición química; (Trenkel, 2010). Ejemplos de fertilizante naturales incluyen abonos vegetales, como el abono verde o cultivos de cubierta, todos los abonos animales (pollos, vacas, y aves de corral) y compost (Shukla y Maitra, 2013).

5.1.3 Liberación controlada

Los fertilizantes de liberación controlada (Controlled Release Fertilizer o CRF) son un tipo de fertilizantes diseñados, por lo general, encapsulando o recubriendo los nutrientes activos mediante el empleo de materiales orgánicos e inorgánicos, que pueden ser polímeros o resinas o una combinación de estos y los cuales presentan cierta permeabilidad a la humedad. En términos generales el funcionamiento de este tipo de fertilizantes viene dado por un mecanismo de difusión de los nutrientes en solución hacia el medio externo en donde el paso limitante de la velocidad de liberación viene determinado por el paso de los nutrientes por la membrana más externa. Los fertilizantes de liberación controlada se caracterizan porque la tasa, el mecanismo de nutrientes sean independientes de las condiciones ambientales, dentro de ciertos límites. (Liu et al. 2017)

5.2.- De acuerdo a la formulación

5.2.1.- Fertilizantes encapsulados

Consiste en cubrir un fertilizante soluble convencional como la urea con un protector o recubrimiento (encapsulación) de un material insoluble en agua, semipermeable o impermeable con poros. El material de recubrimiento puede estar formado por polímeros hidrófobos que pueden ser termoplásticos o resinas, polímeros hidrofílicos como los hidrogeles y materiales inorgánicos tales como recubrimientos a base de azufre o minerales. Esto controla la penetración del agua y por tanto la velocidad de disolución del agente activo. Por otro lado, la difusión por la membrana más externa es el paso limitante de la rapidez de liberación. (Sempeho et al. 2014)

5.2.2.- Fertilizantes Degradables

El fertilizante degradable se caracteriza porque el material activo forma parte de la estructura molecular del compuesto que lo contiene, unido por lo general por enlace covalente, que mediante apertura química o enzimática se va liberando gradualmente. De esta forma, los fertilizantes naturales son considerados en esta clasificación como el humus,

compost, no obstante, también se presentan manufacturados como la urea-formaldehído UF. (Liu et al. 2017)

5.2.3.- Fertilizantes de Matriz Polimérica

Estos se caracterizan porque el fertilizante soluble se dispersa en un continuo reticulado que restringe la disolución del mismo. Los materiales utilizados para la preparación de matrices pueden ser materiales hidrofóbicos como las poliolefinas, y polímeros formadores de gel (hidrogeles) que son de naturaleza hidrófila. (Sempeho et al. 2014). El mecanismo de liberación de la especie activa viene dado por la difusión a través de los espacios o intersticios hidratados de los enredos macromoleculares que conforman al hidrogel hacia el medio externo (Ebara, 2014).

5.2.3.1.- Método de carga “In situ”

Este se caracteriza porque el agente activo se adiciona durante o posterior a la síntesis del hidrogel quedando contenido en su estructura por captura física o mecánica, o quedando la especie activa enlazada covalentemente con la estructura. Por lo general, este método es mucho más eficiente que el método de carga por hinchamiento ya que asegura una liberación controlada de la especie activa.

Entre la desventaja de este método, es que se puede modificar las propiedades mecánicas de la matriz polimérica como consecuencia de la presencia de la especie activa durante la formación del polímero. (Liu et al. 2007)

5.2.3.2.-Método de carga por hinchamiento y secado

Se caracteriza por cargar la especie activa durante el hinchamiento del hidrogel a partir de una solución de la especie activa y, una vez alcanzado el estado de equilibrio de hinchamiento se procede a colapsar el hidrogel impregnado a su forma vítrea mediante secado.

La desventaja de este método es que, durante el proceso de secado de la matriz polimérica, la especie activa tiende a acumularse en la superficie de la misma lo que puede originar un

efecto de liberación inmediata de todo el contenido. Además, si la solución acuosa de la especie activa disminuye notablemente el hinchamiento del hidrogel en comparación con su hidratación en agua pura, disminuye la eficiencia de carga del compuesto. De lo anterior, se tiene que moléculas orgánicas y biomoléculas de peso molecular elevado tienden a ser poco favorables para la aplicación de este método, al igual que compuestos hidrofóbicos poco solubles en la fase acuosa y la matriz hidrofílica. (Liu et al. 2007)

6.- Técnicas empleadas para retardar la liberación del compuesto en los hidrogeles

Por lo general, la aplicación de los hidrogeles es la liberación de la especie activa en un determinado periodo de tiempo bajo ciertas condiciones. Por lo general, las especies activas hidrofílicas tienden a liberarse de manera rápida de la matriz polimérica, en cuestión de horas o días, por lo que limita su uso para aplicaciones en que se desea retardar dicha liberación. Para esto se emplean técnicas que aumenten la afinidad de la especie activa por la matriz polimérica que lo contiene. La forma física más sencilla es aumentando la barrera difusiva del hidrogel, esto se puede conseguir empleando una mayor cantidad de agente entrecruzante, no obstante, esto por lo general origina un cambio no deseado en las propiedades mecánicas y de hinchamiento del hidrogel, además que minimiza la capacidad de la misma de responder a los estímulos externos (Hoare y Koane, 2008). Entre las técnicas empleadas se tiene:

6.1.- Interacción física

Esta aplica a las interacciones iónicas que se pueden presentar entre la especie activa y la matriz polimérica. Por lo general, la matriz polimérica hidrofílica presenta grupos aniónicos en solución acuosa, los cuales pueden interaccionar con las cargas catiónicas que se pudieran presentar en una determinada especie activa. (Hoare y Koane, 2008).

6.2.- Interacción química o covalente

Este se caracteriza porque la especie activa está enlazada covalentemente a la matriz polimérica. Esto se puede realizar diseñando la síntesis del hidrogel de forma que la especie activa quede enlazada covalentemente a la estructura molecular del polímero. De esta

forma, la liberación viene dada por apertura química o enzimática del enlace covalente entre la especie activa y la matriz. (Hoare y Koane, 2008).

7. Suelos en la Agricultura

De acuerdo a Baker, s.f., clasifica los suelos de acuerdo la textura y el color de los mismos

7.1.- Suelos Arcillosos

Los suelos arcillosos son de color amarillo a rojo. La arcilla tiene partículas muy pequeñas que se pegan. Las partículas se adhieren fácilmente al hierro, manganeso y otros minerales. Estos minerales crean el color en arcilla. Los suelos arcillosos absorben el agua, pero tienen un drenaje deficiente. Las raíces de las plantas pueden ser privadas de oxígeno de los suelos arcillosos cargados de agua

La arcilla tiene una textura suave debido a su pequeño tamaño de partícula. En comparación con otros suelos, una gran cantidad de arcilla puede estar en un espacio pequeño porque no hay brechas, mientras que el suelo con partículas grandes tiene muchas más brechas. Debido al pequeño tamaño de las partículas de la arcilla, el suelo es muy denso y se une entre sí, por lo que algunas raíces de las plantas no pueden penetrar en el suelo arcilloso.

7.2.- Suelos Limosos

El limo tiene el color beige a negro. Las partículas de limo son más pequeñas que las partículas de arena y más grandes que las partículas de arcilla. Aunque el limo tiene una alta composición mineral, predominantemente de cuarzo, no tiene capacidad de retención de agua.

7.3.- Suelos Arenosos

Son de color gris claro a blanco. Los suelos arenosos están desprovistos de la mayoría de los minerales que le dan color al suelo. La arena tiene partículas grandes y gruesas que no

se pegan entre sí. Esta estructura del suelo permite que el agua se drene fácilmente, pero también permite que los nutrientes se filtren del suelo.

7.4.- Humus

El humus son las partículas estabilizadas de la materia orgánica altamente descompuesta. De color marrón oscuro, el humus se forma durante varios años y proporciona nutrientes y estructura del suelo para el crecimiento de las plantas. El humus debe comprender aproximadamente el 50 por ciento del suelo del jardín para un crecimiento óptimo. Los suelos ricos en humus y materia orgánica en descomposición son de color marrón oscuro a negro. El humus tiene la propiedad de absorber y drenar el agua.

8.- Técnicas de caracterización

8.1.- Calorimetría de Barrido Diferencial (DSC)

La calorimetría consiste en medir el calor emitido y/o absorbido durante las transiciones termodinámicas o reacciones químicas. La calorimetría de barrido diferencial o DSC (Differential Scanning Calorimetry) mide la cantidad de calor absorbido o emitido por dos muestras sometidos a ciclos de calentamiento y/o enfriamiento: la muestra a medir y una muestra de referencia. La diferencia en el flujo de calor constituye la señal en DSC. Ambos, la muestra y la referencia se mantienen a casi la misma temperatura durante todo el experimento. En general, el programa de temperatura para un análisis de DSC está diseñado de tal manera que la temperatura de la muestra aumente linealmente como función del tiempo. La muestra de referencia debe tener una capacidad calorífica bien definida en el rango de temperaturas a ser emplear (Markovic et al. 2016)

8.2.- Análisis Térmico Diferencial (DTA)

El análisis térmico diferencial o DTA (Differential Thermal Analysis) es una técnica termoanalítica, en donde la muestra y una referencia inerte experimentan ciclos térmicos idénticos, mientras se registra cualquier diferencia de temperatura entre la muestra y la referencia por lo tanto una curva DTA proporciona datos sobre las transformaciones que se han producido, tales como transiciones de cristalización, fusión, sublimación y vítrea.

(Manfred et al. 2008). Esta diferencia de temperatura se grafica en función del tiempo o de la temperatura (curva DTA o termograma). El área bajo un pico de DTA es el cambio de entalpía y no se ve afectado por la capacidad calorífica de la muestra. La muestra y referencia son calentadas por la misma fuente. (Markovic et al. 2016)

8.3.- Espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FT-IR)

La espectroscopia infrarroja (espectroscopia IR) es la que emplea la región del infrarrojo del espectro electromagnético, que es luz con una longitud de onda más larga y una frecuencia más baja que la luz visible, cubre una gama de técnicas, principalmente basadas en espectroscopia de absorción. Para una muestra dada que puede ser sólida, líquida o gaseosa, La porción infrarroja del espectro electromagnético (generalmente se divide en tres regiones; el infrarrojo cercano, medio y lejano, que lleva el nombre de su relación con el espectro visible. La espectroscopia infrarroja está basada en el hecho que las moléculas absorben frecuencias específicas que son características de su estructura. Estas absorciones son frecuencias resonantes, es decir, la frecuencia de la radiación absorbida coincide con la transición de energía del enlace o grupo que vibra. De esta forma las posiciones de las bandas de absorción en el espectro dan información sobre la presencia o ausencia de grupos funcionales específicos en una molécula y además todo el espectro constituye una “huella dactilar” se puede emplear para determinar la identidad de la muestra. (Markovic et al. 2016)

III. ANTECEDENTES

Ding et al. 2016, desarrollaron un nuevo fertilizante a base de gel de liberación lenta/controlada (G-CRF), que se produjo mediante la combinación de varios materiales naturales, seminaturales y sintéticos de macromateriales orgánicos y minerales naturales inorgánicos con fertilizantes NPK (nutrientes esenciales). Se estudiaron las características de liberación de nutrientes para comparar con los fertilizantes convencionales a través del método de lixiviación en columna. También se investigaron las influencias de los factores del suelo, incluidos la temperatura, el pH, el agua y la carga de nutrientes en el G-CRF en la liberación de nutrientes mediante el método de incubación suelo-agua. Los resultados

indicaron que el CRG-G tuvo un mejor efecto en el control de la liberación de los nutrientes N, P y K; siendo más eficiente cuando el contenido de agua en el suelo fue inferior al 45% (p/p), la temperatura fue inferior a 35°C, y el pH del suelo estaba en el rango de ácido débil a neutro. Por último, consideran el efecto de liberación controlada de los nutrientes y el costo de los materiales del G-CRF, determinan que “los contenidos de nutrientes NPK en el G-CRF óptimos oscilen entre el 30 y el 35%”.

Rabat, Hashim y Majid, 2016, realizaron un estudio comparativo de hidrogeles formados por tres monómeros hidrofílicos ácido acrílico P(AA), acrilamida P(AAm) y ácido acrílico y acrilamida P(AA-co-AAm) en la retención de agua y en el crecimiento de la especie de cultivo de ají *Capsicum annuum*.

La inserción del fertilizante (urea) en la matriz polimérica se realizó empleando la técnica de polimerización "in situ". Del estudio comparativo del mantenimiento de agua en el suelo se obtuvo que la evaporación del agua de la mezcla de suelo con los hidrogeles P(AA), P(AA-Co-Am;), P(AAm) es significativamente menor a la obtenida con respecto al blanco, debida a la interacción del agua con los hidrogeles mediante la hidratación de la red del polímero.

Del estudio de los hidrogeles como fertilizantes de liberación lenta en función del desarrollo de la planta de ají *Capsicum annuum*, se emplearon las variables de crecimiento como la altura de la planta y el ancho de hoja durante el periodo de tiempo de 3 a 7 semanas. Además, los hidrogeles fueron mezclados con el suelo en la relación de 1g hidrogel/150g suelo. Se encontró que para la P(AA) la planta presenta una diferencia significativa tanto en altura como en área de hoja en comparación con la (AAm), seguida de P(AA-AAm) con mejores resultados, atribuido principalmente al índice mayor de salinidad que presenta la P(AAm) por su mayor contenido de nitrógeno, que se convierte a amoníaco impidiendo que las raíces de las plantas absorban agua con un contenido considerable de sales. Por último, concluyen que las matrices poliméricas de hidrogel pueden ser utilizadas como fertilizantes de liberación lenta.

Carneiro et al. 2016, investigó los efectos de la fertilización con nitrógeno en la aplicación de hidrogel en el desarrollo y la productividad de *Capsicum sp.* Para el experimento se aplicó un diseño factorial de bloques aleatorios 2x5, con y sin la aplicación de hidrogel (factor A) y con cinco dosis de N (factor B) (0; 50; 100; 150 y 200 kg/ha), y cuatro réplicas. Se realizó un análisis del contenido de nitrógeno foliar, contenido de clorofila, altura de la planta, diámetro del tallo, longitud de la fruta, diámetro de la fruta, número y peso de la fruta y productividad.

Encontraron que a pesar del efecto ligeramente positivo del hidrogel en el desarrollo de la especie *Yellow lantern chili*, los valores promedio del crecimiento, grosor del tallo y diámetro y longitud de la fruta no muestra diferencias significativas con y sin hidrogel. Cuando evaluaron el efecto de las dosis de nitrógeno en la altura de la planta, grosor de diámetro y longitud del fruto no encontraron interacción o efecto alguno con estas variables. Para las dosis de nitrógeno el rango de 0-240 kg/ha se encontró un efecto significativo sobre el número de frutas por planta y productividad determinando el máximo a la dosis óptima de 180 kg/ha.

En la variedad *Malagueta pepper*, encontraron que la aplicación de hidrogel influye significativamente en la altura de la planta, grosor de los tallos y diámetro de la fruta, pero no muestra diferencia significativa en las demás variables. La evaluación de las dosis de nitrógeno para el rango empleado de 0-240 kg/ha no mostraron diferencia significativa con las variables analizadas, concluyendo que “puede deberse a los factores genéticos de la planta que causan que la misma no esté en la capacidad de absorber los nutrientes disponibles”. Encontraron que el número de frutas, el contenido de nitrógeno en las hojas y la productividad se incrementaron en 40%, 13% y 38%, respectivamente; con la aplicación de hidrogel en comparación a la ausencia del mismo

Mutar y Kmai, et al. 2012, prepararon hidrogeles constituidos por acrilamida (AAM) y ácido acrílico (AA) como agente entrecruzante por copolimerización vía radicales libres en solución acuosa. Las estructuras de los hidrogeles de poliacrilamida fueron copolimerizadas con las cantidades de 0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 mg de AA empleando N, N'-metilen-bisacrilamida (MBA) como agente entrecruzante auxiliar a la temperatura de 60 °C por 2

horas. Durante la síntesis se adiciona las cantidades de (0.1, 0.2, 0.3) mg nitrato de sodio empleado como fertilizante.

Se determinó que el incremento de ácido acrílico en la estructura del hidrogel en el rango 0.1 mg -2.0mg produce un incremento proporcional en la absorción de agua aproximadamente del 300 % para el máximo valor de AA empleado, encontrando que el ácido acrílico tiene una fuerte influencia en la capacidad de absorción de agua de los hidrogeles copoliméricos, señalando que “la presión osmótica positiva es debido a la presencia de los grupos COO-”. Por último, hacen referencia a “los ácidos carboxílicos en el ácido acrílico exhiben una alta capacidad de cargar moléculas de agua en comparación al grupo amida en la acrilamida (Zhang, 2009). De manera similar al estudiar la cantidad de nitrato de sodio liberado en función de las concentraciones de AA empleadas para la formulación del hidrogel se encontró que “un incremento en la tasa de liberación de fertilizante responde a una capacidad más elevada de absorción por parte del hidrogel” citando que “la alta eficiencia de carga de la formulación del hidrogel se debe a su hidrofilicidad” (Zhang, 2009).

Por último, se estudia la liberación del nitrato de sodio en función de diferentes cantidades cargas del mismo (0.1 ,0.2, 0.3) mg a la matriz polimérica para una concentración específica de AA. Los resultados muestran que la carga se incrementa con el incremento de la cantidad de nitrato de sodio cargado a la matriz. Los perfiles de liberación indican que “la cantidad liberada de nitrato de sodio se incrementa conforme a la carga de la especie activa en el hidrogel” citando que “esto es debido a una mayor rapidez del movimiento del solvente penetrando la superficie del hidrogel que presenta mayor cantidad de especie activa en su matriz (Bajpai y Giri, 2002), infiriendo simplemente que “es atribuido a la cantidad mayor de agente activo cargado”.

Rahman, Das, Miah y Ahmad, 2008, se enfocaron en la preparación y aplicación de un fertilizante de liberación lenta que podría ser empleado en las regiones subtropicales y con tendencias a las lluvias. El fertilizante de liberación retardada fue preparado por inmovilización covalente de urea en la matriz de un polímero biodegradable constituido por acrilamida y ácido maléico. El desarrollo del cultivo de chile verde *Capsicum annuum* se

empleó como una medida de efectividad del fertilizante creado. Se encontró que para el cultivo *Capsicum annuum* en presencia del fertilizante de liberación lenta identificado como P(AAm-MA)U mostró una diferencia significativa al 5% de probabilidad para la altura y números de hojas en la planta en comparación con los tratamientos con urea y control (sin fertilizante) bajo las mismas condiciones. Igualmente se encontró una diferencia significativa al 5% de probabilidad en el contenido de N disponible en el suelo para las muestras tratadas con P(AAm-MA)U en comparación con los tratamientos con urea y control.

Los resultados sugieren que el P(AAm-MA)U mejora el crecimiento y desarrollo de las plantas como también mantienen contenidos de nitrógeno más alto en suelo por periodos más largos. Considerando que “si todos los tratamientos se mantuvieron en condiciones idénticas ambientales, se puede asumir que “el desarrollo más rápido de plantas en P(AAm-MA)U se debe a un mantenimiento y liberación lenta de N de la matriz polimérica”. Contenidos de N relativamente más altos en los suelos tratados con P(AAm-MA)U se pueden deber por el efecto del fertilizante en la reducción de erosión, evaporación y filtración del suelo, concluyendo que P(AAm-MA)U puede ser utilizado como fertilizante de liberación lenta.

Karadağ, Üzüüm y Saraydin, 2002, estudiaron un método conveniente para la remoción del colorante Azul de Toluidino por adsorción en una nueva matriz polimérica constituida por acrilamida y ácido maléico.

Se sintetizaron hidrogeles superabsorbentes de acrilamida co- ácido maléico (AAm/AM) por polimerización por radicales libres en solución acuosa empleando agentes entrecruzantes de origen sintético. Se determinó que para las cantidades empleadas del copolímero ácido maléico (0, 20, 40, 60) mg AM se presenta un incremento en la absorción en medio acuoso aproximadamente 600% para la cantidad más alta de AM, afirmando que “el equilibrio de absorción se incrementa conforme al incremento de ácido maléico en el hidrogel AAm/AM debiéndose al incremento de los grupos hidrofílicos COO- presentes en la molécula de AM”.

Al estudiar la interacción del hidrogel con el colorante catiónico BB-17 empleando la técnica de adsorción en baño a 25 °C, se determinó que “el radio de adsorción del sistema hidrogel/colorante se incrementa gradualmente con el incremento de ácido maléico en el hidrogel, esto debido al incremento en la interacción de un mayor número de grupos catiónicos monovalentes del colorante con los grupos carboxílicos presentes en el ácido maléico. Los colorantes de tipo aniónicos no son absorbidos de ningún modo.

Se determinó que los valores del contenido de agua en el equilibrio en el hidrogel se ubican en el rango de 0.88-0.98 unidades. Este resultado mostró que los hidrogeles AAm/AM se podrían utilizar como un nuevo material (como un biomaterial) en algunas aplicaciones biomédicas, porque el contenido de agua en el hidrogel es más alto que el valor del contenido de agua en el cuerpo, que está alrededor de 0.60.

Del estudio concluyeron que “los hidrogeles AAm/AM se pueden usar como superabsorbentes de agua para el transporte de algunas sustancias en entornos acuáticos en farmacéutica, agrícola, ambiental y aplicaciones biomédicas, o en las aplicaciones de inmovilización de moléculas biológicamente activas. Por último, resaltan que los hidrogeles AAm/AM pueden utilizarse como un adsorbente para contaminantes del agua como los colorantes catiónicos, un importante problema de la industria textil”.

Añez y Figueredo, 1993, evaluaron el efecto de diferentes dosis de nitrógeno (DN) y distancia entre hileras (DH) sobre el crecimiento vegetativo y la producción de frutos de plantas de ají dulce de la especie *Capsicum chinense* en un suelo Cambortid típico franco-arenoso de San Juan de Lagunillas, Edo. Mérida, Venezuela, empleando cuatro DN: 0; 150; 300 y 450 kg/ha y tres DH: 0,4; 0,8 y 1,2 m, en un arreglo factorial de parcelas divididas en bloques al azar con tres repeticiones, encontrando en términos generales que el rendimiento aumentó con la disminución de las DH y con todas las aplicaciones de nitrógeno al compararlo con las parcelas sin fertilización nitrogenada.

IV. Objetivos

Objetivo general

Estudiar el desarrollo del cultivo de pimiento dulce de la especie *Capsicum frutescen* sen en suelo de la zona seca de San Juan de Lagunillas empleando un fertilizante de liberación lenta de matriz polimérica hidrofílica

Objetivos Específicos

Estudiar la variación del hinchamiento del hidrogel (fracción de agua en peso) para las diferentes concentraciones de fertilizantes empleadas en comparación con su hinchamiento en agua pura.

Estudiar la variación de la altura del tallo y ancho de hoja de la planta en estudio para los suelos tratados con diferentes cargas de fertilizante en hidrogel

Determinar si existe una diferencia significativa en el desarrollo de las plantas tratadas con el fertilizante de liberación lenta en comparación con el blanco y control

Analizar la caracterización los hidrogeles de acrilamida-co-ácido maléico por medio de las técnicas de Análisis Termogravimétrico (TGA) y Calorimetría de Barrido Diferencial (DSC), empleando como referencia el estudio de Quintero (2013)

Analizar la caracterización los grupos funcionales presentes en los hidrogeles acrilamida-co-ácido maléico mediante el uso de la Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (IR-FT) empleando como referencia el estudio de Quintero (2013).

V. Hipótesis

Los hidrogeles aniónicos a base de acrilamida han sido ampliamente utilizados como acondicionadores del suelo en la agricultura y como retenedores de fertilizantes en tiempos recientes; por lo que el hidrogel constituido por acrilamida-co-ácido maléico debería mejorar el desarrollo de una especie hortícola en un suelo poco apto para la agricultura.

VI. Parte experimental

1.1-Materiales Generales Empleados

Acrilamida-co-ácido maléico de proporción 80:20 el cual tiene asociado un radio de hinchamiento en agua destilada de 9000%. Este hidrogel se sintetizó en el trabajo de Marisol (2014)

El fertilizante comercial Orquidex es de proporción 10:30:20 NPK.

Las concentraciones de fertilizante 0.1%, 0.5%, 1.0%, 1.5% empleadas para el hinchamiento de la matriz polimérica oscilan alrededor de la recomendada por el fabricante para uso de riego (5 g/L) equivalente al 0.5% en peso.

La tierra arcillosa empleada fue extraída en un paraje desértico ubicado en el municipio Sucre, San Juan de Lagunillas del Estado Mérida.

El cultivo de prueba es una planta de ají dulce de la especie *Capsicum frutescens* el cual responde en crecimiento a la fertilización nitrogenada.

La balanza analítica es de marca OHAUS, modelo AS200, apreciación (+/-) 0,0001 g.

1.2- Caracterización por análisis térmico y Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FT-IR).

Para el análisis térmico de la matriz polimérica se emplearon las técnicas de Análisis Termogravimétrico (TGA) y Calorimetría de Barrido Diferencial (DSC), mientras que para la caracterización de los grupos funcionales se empleó la espectrofotometría de absorción infrarroja (FT-IR), en base al estudio de Quintero (2013). En el estudio de Quintero (2013) se emplearon las matrices de acrilamida co-ácido maléico en la proporción 50:50, identificada como “AAm-co-AM”, y la correspondiente matriz impregnada en solución de plomo 15 ppm identificada como “(AAm-co-AM)-Pb²⁺”.

Caracterización por análisis Termogravimétrico (TGA) y Calorimetría de Barrido Diferencial (DSC).

Los estudios de estabilidad térmica de los hidrogeles AAm-co-AM y (AAm-co-AM)-Pb²⁺ se realizaron en el rango de temperatura entre los 20°C a 180°C con velocidad de calentamiento de 5 °C/min y flujo de nitrógeno de 100 ml/min empleando un analizador térmico marca TA Instruments modelo SDT Q600. El tamaño de muestra fue entre 7-8 mg.

Caracterización por Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FT-IR)

Las matrices poliméricas deshidratadas AAm-co-AM y (AAm-co-AM)-Pb²⁺, se pulverizaron empleando un mortero y posteriormente mezclados con bromuro de potasio sólido para la formación de las pastillas KBr como muestras de análisis. El equipo empleado es de marca Perkin-Elmer, modelo RX1.

1.3.- Carga de fertilizante en la matriz polimérica

Preparación de las soluciones de fertilizante

Para la preparación de las soluciones de fertilizante de concentraciones 0.10 %, 0.50%, 1.0%, 1.5% en peso se pesaron las cantidades de 0.10, 0.50, 1.0, 1.5 g y se disolvieron por separado empleando 10 mL de agua destilada en un balón aforado de 100 mL Se empleó la balanza analítica OHAUS modelo AS200 (0,0001 g) para todas las mediciones de masa.

Determinación del radio de hinchamiento

Para la determinación de la dependencia del radio de hinchamiento del hidrogel acrilamida co-ácido maléico en función de las concentraciones de fertilizante en solución se procedió a pesar aproximadamente 0.20 g de la matriz polimérica, peso inicial “Mi”, y para luego ser sumergidas en 100 mL de las respectivas soluciones de fertilizantes (0.10 %, 0.50%, 1.0%, 1.5%) y agua destilada empleando un vaso de precipitado como contenedor. Posteriormente, transcurridos 3 días aproximadamente se retiraron los hidrogeles esféricos de las soluciones de fertilizantes para ser levemente escurridas empleando un colador y posteriormente pesadas, peso final (Mf). Las medidas de las masas de los hidrogeles

hinchados (M_f) se realizaron por triplicado. Empleando la siguiente ecuación se obtiene el radio de hinchamiento de los hidrogeles en las respectivas soluciones de fertilizante y en agua destilada

$$\%H = \frac{M_f - M_i}{M_i} \times 100$$

Determinación del porcentaje de carga

Para la determinación del peso neto porcentual de fertilizante contenido en la matriz polimérica, porcentaje de carga de fertilizante “%C”, se procedió a deshidratar cada uno de los hidrogeles (procedimiento previo) por secado en una estufa (marca General Sigan Company, modelo Lindberg-Blue), hasta alcanzar peso constante a una temperatura cercana a los 50°C, posteriormente se determina el peso de la matriz deshidratada, peso final de la matriz (M_f), para obtener el porcentaje de carga mediante la relación

$$\%C = \frac{M_f - M_i}{M_i} \times 100$$

donde, M_i es el peso inicial de la matriz

1.4.- Estudio del desarrollo de la planta

Se empleó una metodología similar a la empleada en el trabajo de *Rabat, Hashim y Majid, (2016)* para el estudio del desarrollo de las plantas en suelos diferentemente tratados. Esta se caracteriza por el empleo de una sola planta por suelo tratado para evitar la competencia por nutrientes, mientras que las variables medidas del desarrollo de la planta fueron la altura del tallo y el ancho de hoja durante un periodo ubicado entre la tercera y séptima semana.

Inicialmente se empleó un semillero a base de humus para propiciar una germinación, y desarrollo óptimo de las plántulas. En el momento que las plántulas alcanzaron una altura

mínima adecuada se procedió a trasplantarlas a los respectivos suelos tratados con el fertilizante de liberación lenta.

Para la preparación de los suelos se pesaron aproximadamente 600 g de tierra arcillosa cernida, y se colocó contenedor de plástico con una profundidad alrededor de 15 cm, los cuales fueron previamente identificados “0.10%”, “0.50%”, “1.0%”, “1.5%” hidrogel sin fertilizante “blanco” y sin tratamiento alguno “control”.

Seguidamente, se procede a “tratar” los respectivos suelos (600 gramos) con una masa (aproximada) de 0.20 gramos de fertilizante de liberación lenta en su forma deshidratada, adicionando pequeñas cantidades de agua para facilitar un mezclado uniforme. Posteriormente, se procede a trasplantar una sola plántula por cada suelo tratado o contenedor.

Las plantas se mantuvieron bajo las mismas condiciones ambientales de temperatura y humedad, en un ambiente cálido 25°C (Sur de la ciudad de Mérida) y regándolas de forma de prevenir un exceso de agua.

Para mantener la humedad del suelo de 600 g de tierra arcillosa se empleó una cantidad alrededor de 30 mL de agua potable utilizando el “método del pulgar” cuando se mostraba seca.

Para medir el desarrollo de la plántula se empleó una regla milimétrica común.

2.- Parte experimental para el frijol rojo, *Vigna umbellata*

2.1- Metodología General

La matriz polimérica empleada corresponde a un hidrogel extraído de pañales comerciales Pannpaos[®], el cual se caracteriza por poseer un radio de hinchamiento en agua potable del 16000 %.

El fertilizante comercial empleado fue Fetiagro[®], recomendado para el desarrollo de las plantas leguminosas.

La tierra empleada se trató con una cantidad mínima de tierra abonada para asegurar una cantidad adecuada de micronutrientes

El cultivo de prueba es una planta leguminosa de frijol rojo, *Vigna umbellata*.

2.2. - Carga de fertilizante en la matriz polimérica

Preparación de las soluciones de fertilizante

Las concentraciones recomendadas por el fabricante para la fertilización manual o directa oscilan entre 0.2 a 0.3 partes por mil de agua. Para la preparación de las soluciones se empleó un volumen de agua de 100 mL pesando las respectivas cantidades de fertilizante 0.020 g, 0.050 g y 0.080 g para obtener su peso porcentual 0.020 %, 0.050 % y 0.080 %, respectivamente.

Determinación del radio de hinchamiento

Para la determinación de la dependencia del radio de hinchamiento del hidrogel extraído de pañales comerciales Pannpaos®, en función de las concentraciones de fertilizante empleadas se procedió a pesar aproximadamente 0.50 g de la matriz polimérica (peso inicial “Mi”) para luego ser sumergidas en 100 mL de las respectivas soluciones de fertilizantes (0.020 %, 0.050 %, 0.080 %). Posteriormente, cuando alcanzan un peso constante, los hidrogeles son levemente escurridas empleando un colador y posteriormente pesadas (peso final “Mf”). Empleando la siguiente ecuación se obtiene el radio de hinchamiento de los hidrogeles en las respectivas soluciones de fertilizante y en agua destilada

$$\%H = \frac{Mf - Mi}{Mi} \times 100$$

2.3.- Estudio del desarrollo de la planta

Para la preparación de los suelos se pesaron aproximadamente 500 g de tierra cernida, y se colocó en un contenedor de plástico con una profundidad aproximada de 15 cm previamente identificados “0.020 %”, “0.050 %”, “0.080 %”, hidrogel sin fertilizante “blanco” fertilización manual o directa (sin hidrogel), y tierra sin tratamiento alguno “control”.

Seguidamente, se procede a “tratar” los respectivos suelos (500 g) con una masa aproximada de 50 gramos del hidrogel empleado, adicionando pequeñas cantidades de agua para facilitar un mezclado uniforme. Posteriormente, se procede a sembrar un máximo de 5 semillas de frijol rojo *Vigna umbellata* por contenedor.

Las plantas se mantuvieron bajo las mismas condiciones ambientales de temperatura y humedad en un ambiente relativamente cálido 25°C (Sur de la ciudad de Mérida), y regándolas de forma de prevenir un exceso de agua.

Para mantener la humedad del suelo se empleó una mínima cantidad de agua potable utilizando el “método del pulgar” cuando se mostraba seca.

Para medir el desarrollo de la plántula se empleó una regla milimétrica común.

VII. Resultados

1.- Características físicas y mecánicas de los hidrogeles

Los hidrogeles esféricos AAm-co-AM de proporción 80:20 tienen propiedades elásticas siendo blandos, suaves, y escurridizos entre sí, lo que facilita considerablemente su manejo. A pesar de sus propiedades elásticas, los hidrogeles son mecánicamente débiles.

La matriz polimérica en su estado deshidratado (Xerogel) tiene un radio milimétrico que se caracteriza por una alta dureza.

2.- Técnicas de Caracterización

2.1.- Caracterización por Análisis Termogravimétrico Diferencial (DTGA)

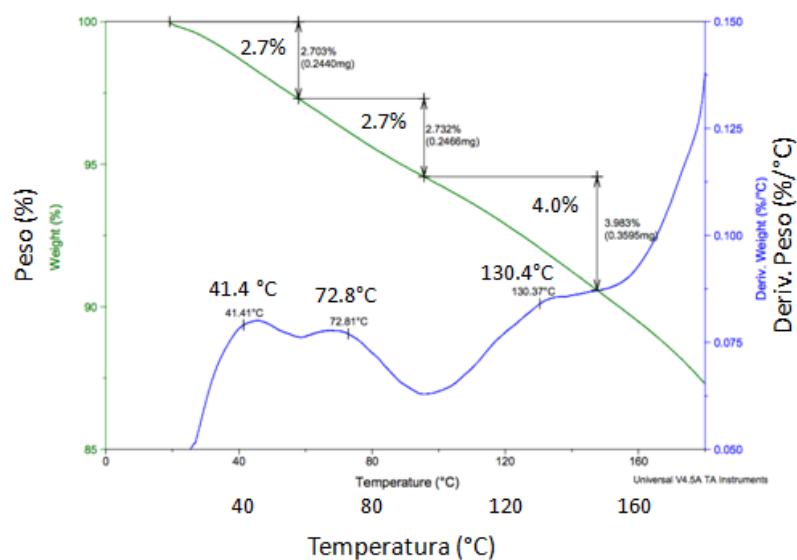


Figura 2.1.- DTGA, AAm-co-AM.

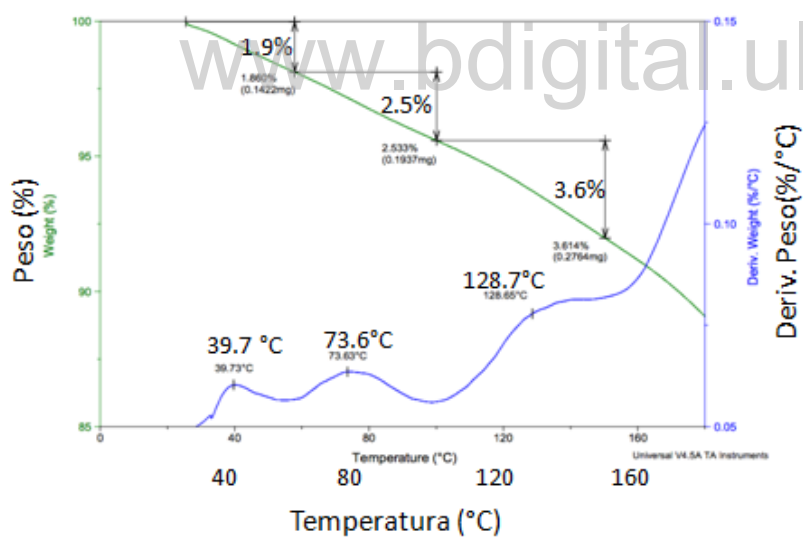


Figura 2.2.- DTGA, (AAm-co-AM)-Pb²⁺

Tabla 2.1. Análisis Termogravimétrico Diferencial, DTGA

Temperatura (aprox.)	AAM-co-AM	(AAM-co-AM)-Pb ²⁺	Pérdida de masa (aprox.)
40 °C	2,71%	1,86%	3%
73°C	2,73%	2,53%	3%
130 °C	3,98%	3,61%	4%

Los gráficos de Termogravimetría Diferencial DTGA representan la pérdida de masa porcentual en función de la temperatura en el rango de 20 °C - 180 °C para el polímero puro AAm-co-AM y el polímero impregnado con plomo (AAM-co-AM)-Pb²⁺.

Se puede observar que tanto para el polímero puro AAm-co-AM como el impregnado con plomo (AAM-co-AM) Pb²⁺, los gráficos presentan una similitud alta tanto para la magnitud de la pérdida de masa como a las temperaturas a las cuales se presentan. Para ambas muestras a las temperaturas de 40 y 73°C se presenta una pérdida de masa cercana al 3.0 % mientras que a la temperatura de 130°C se tiene una pérdida de masa cercana al 4.0% siendo la pérdida de masa global de alrededor del 10.0%.

Resultados similares fueron obtenidos por Bajpai y Johnson (2005), quienes sintetizaron hidrogeles constituidos por acrilamida co-ácido maléico en forma de disco determinando que la temperatura inicial de descomposición del copolímero es de 220°C.

Considerando lo anterior se tiene que el polímero empleado como fertilizante de liberación lenta es estable térmicamente para su aplicación en la agricultura.

2.2- Caracterización por calorimetría de barrido diferencial (DSC)

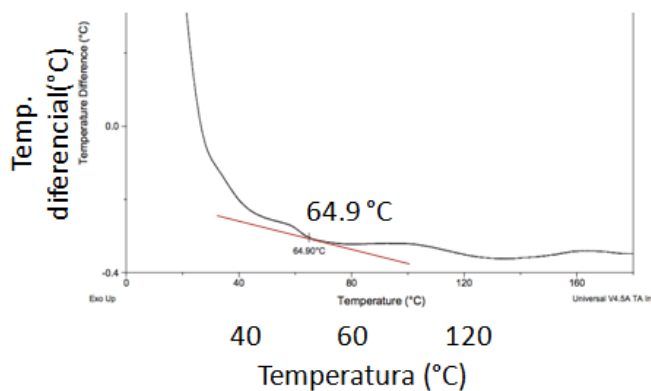


Figura 2.2 (a) DSC, AAm-co-AM

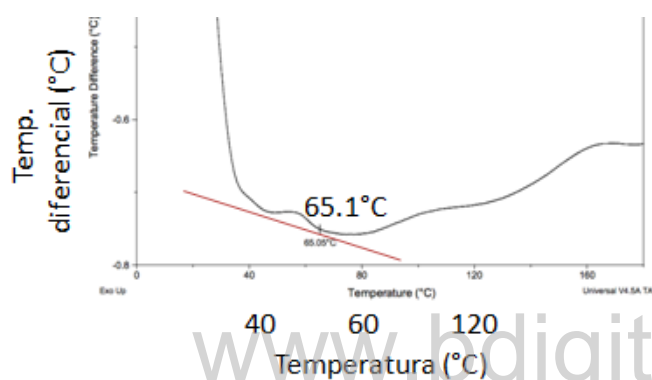


Figura 2.2 (b) DSC del (AAm-co-AM)-Pb²

Tabla 2.2. Determinación temperatura de transición vítrea por DSC	
Hidrogeles	Temp. de transición vítrea
AAm-co-AM	64.9 °C
(AAm-co-AM)-Pb ²⁺	65.1 °C

Los gráficos de calorimetría de barrido diferencial DSC presentan la derivada de la temperatura en función de la temperatura (°C) en el rango de 20°C a 160 °C para el polímero puro AAm-co-AM y el polímero impregnado con plomo (AAm-co-AM)-Pb²⁺, identificando las temperaturas de transición vítrea. Los resultados muestran que la temperatura de transición vítrea para el polímero puro AAm-co-AM es de 64.9 °C mientras que para el polímero (AAm-co-AM)-Pbes de 65.1°C, sin mostrar diferencia significativa en

el valor obtenido por lo que las propiedades físicas del polímero (Aam-co-AM)-Pb no se ven alteradas por la presencia del plomo dentro de su estructura. Así se tiene que el fertilizante de liberación lenta es estable en sus propiedades mecánicas para su aplicación en la agricultura en climas áridos.

2.3.- Caracterización por Espectroscopia Infrarroja (FT-IR)

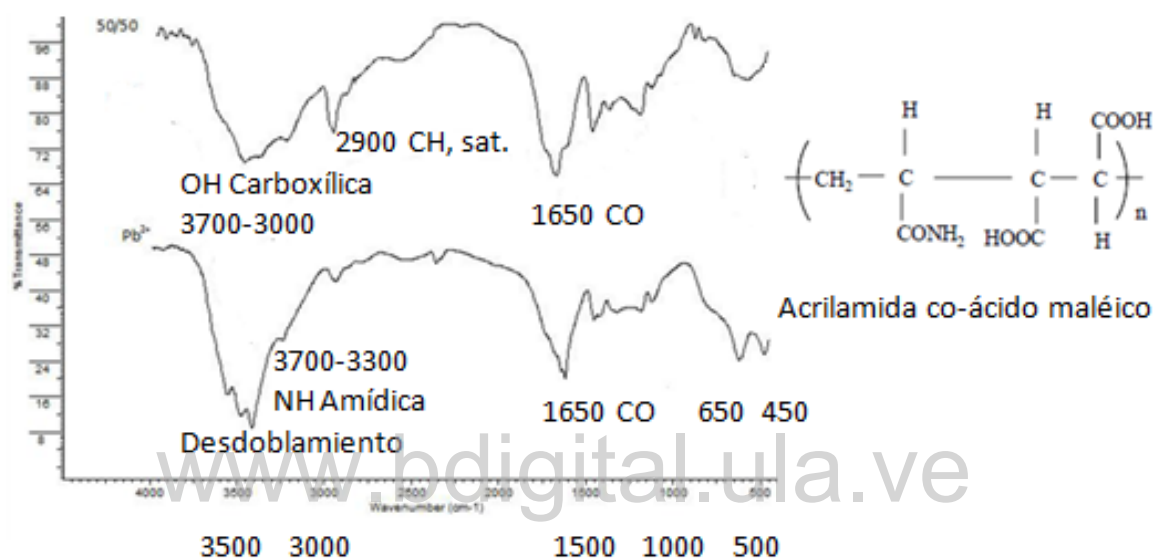


Figura (a) 2.3.- Espectro IR del AAm-co-AM (AAm-co-AM)-Pb²⁺

El gráfico superior corresponde al espectro obtenido para el polímero puro Aam-co-AM mientras que el espectro inferior corresponde al polímero impregnado con plomo (AAm-co-AM)-Pb. El espectro del polímero puro muestra una absorción de banda ancha entre 3700 -3000 cm⁻¹ característica de tensión OH carboxílica, mientras que la absorción que aparece en el espectro del polímero impregnado en plomo tiene un ancho de banda menor, entre 3300cm⁻¹ y 3700cm⁻¹, característica de una tensión NH amídica primaria. Este efecto puede estar asociado a la pérdida de los enlaces intermoleculares por puentes de hidrógeno entre los grupos carboxílicos debido a la sustitución por coordinación de las especies catiónicas (Pb²⁺) que se presenta en el polímero impregnado.

En ambos espectros destaca la absorción intensa CO carboxílica alrededor 1650cm^{-1} . En el espectro del polímero puro se observa la tensión CH saturado a 2900 cm^{-1} la cual se muestra con menor intensidad en el polímero impregnado con plomo.

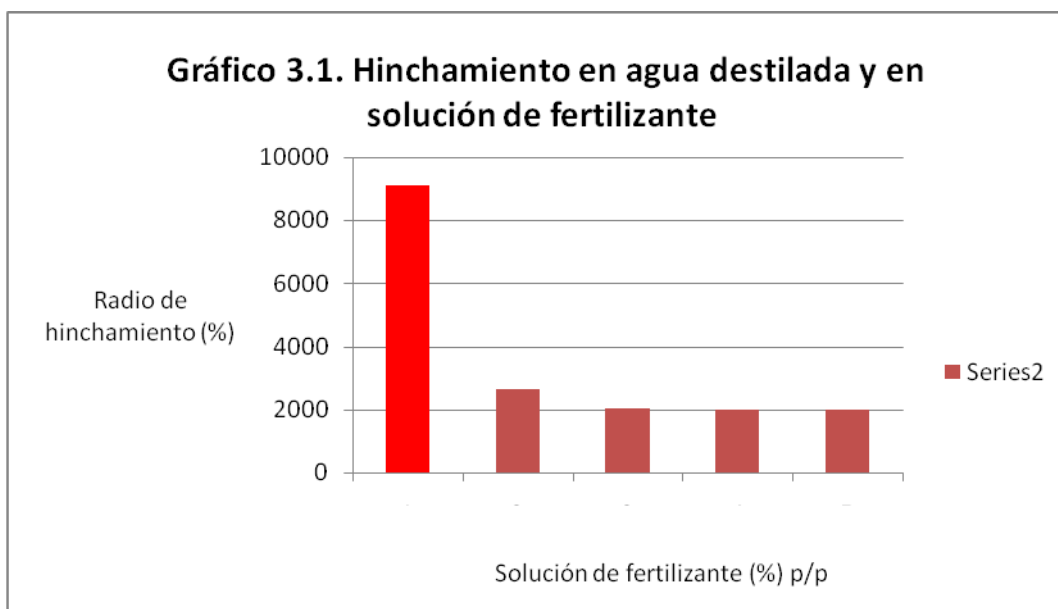
Por último, en la región de la huella dactilar se presenta dos absorciones de intensidad moderada, en el polímero impregnado con plomo a 650 cm^{-1} y 450cm^{-1} , las cuales están ausentes en el polímero puro. Estas absorciones características en la región de la huella dactilar deben estar asociadas a la interacción del metal catiónico con la estructura del polímero.

Globalmente se tiene que, al comparar ambos espectros, las absorciones presentadas anteriormente tensión carboxílica, tensión amídica, tensión carbonílica, tensión hidrocarbonada saturado se corresponden a los grupos funcionales de la estructura del polímero acrilamida co-ácido maléico sin verse alteradas por la presencia e interacción del metal para el caso del polímero impregnado (AAM-co-AM)-Pb

3.- Carga del fertilizante en la matriz polimérica

3.1 Determinación del radio hinchamiento (%H)

Tabla 3.1- Determinación del radio de hinchamiento			
Solución de fertilizante (%p/p)	Matriz polimérica (g)	Hidrogel hinchado (g)	Radio de hinchamiento
0	0,1944	17,880	9098 %
0,1	0,2061	5,610	2622 %
0,5	0,2083	4,455	2039 %
1,0	0,2028	4,200	1971 %
1,5	0,2033	4,220	1976 %



El gráfico 3.1 representa la variación del hinchamiento del hidrogel función de las concentraciones de las soluciones de fertilizante y su relación al hinchamiento en agua destilada

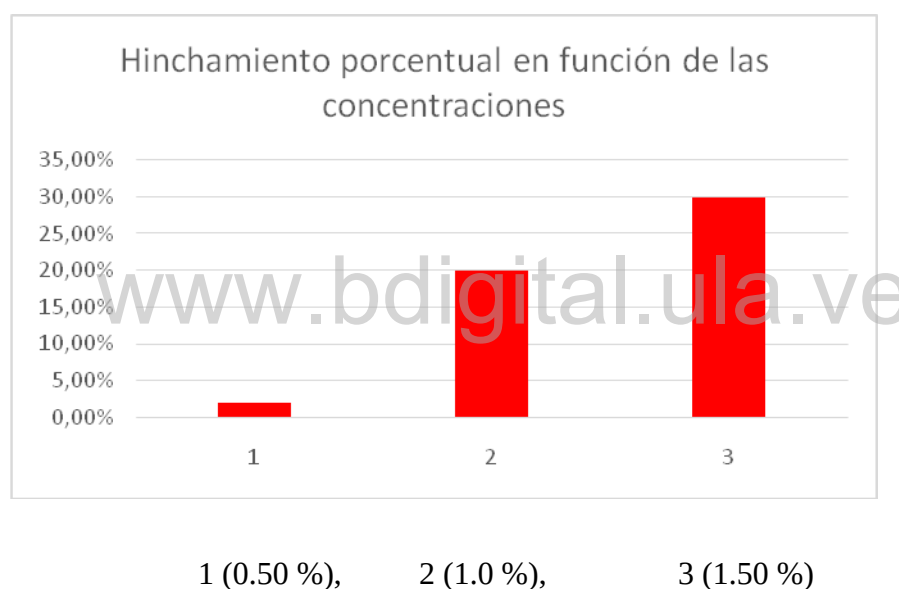
El radio de hinchamiento del polímero AAm-co-AM en agua destilada es del 9000 %, mientras que para las soluciones de concentraciones 0.5 % 1.0 % y 1.5 % es de alrededor del 2000%correspondiendo a un hinchamiento en solución de fertilizante del 25 % con respecto al obtenido en agua destilada. El radio de hinchamiento es ligeramente superior para la solución en peso de fertilizante de 0.1 % siendo de 2600 %.

Este efecto se debe al aumento de la fuerza iónica por la presencia de las especies catiónicas del fertilizante en el medio debido a la presión osmótica entre lo iones dentro y fuera del hidrogel. (Bajpai, 2001)

Resultados similares fueron obtenidos por Quintero (2013) para el hidrogel acrilamida co-ácido maléico disminuyendo el radio de hinchamiento de 40000 % a 6500 % por presencia de solución (catiónica) de plomo.

3.2.- Determinación del porcentaje de carga (% C)

Tabla 3.2. Determinación porcentaje de carga de fertilizante			
Solución en peso de fertilizante (%p/p)	Matriz polimérica (g)	Matriz cargada (g)	Carga de fertilizante (aprox.)
0,10	0,2061	0,1736	No aplica
0,50	0,2083	0,2120	2 %
1,00	0,2028	0,2580	20 %
1,50	0,2033	0,2970	30 %

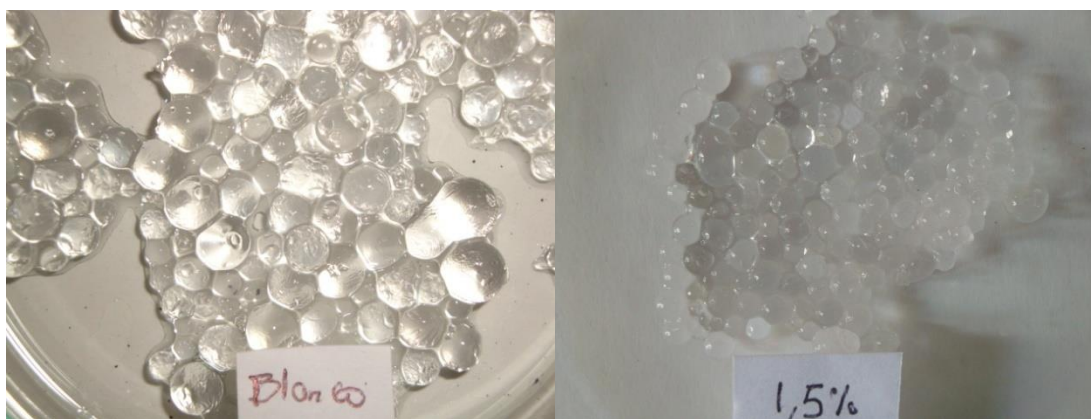


Del gráfico 3.2 representa el porcentaje de carga de fertilizante en la matriz “% C” en función de las soluciones de concentración de fertilizantes empleadas.

Se observa que el porcentaje de carga de fertilizante varía significativamente con la concentración de fertilizante en las soluciones. La solución de mayor concentración de fertilizante 1.5 % presenta un porcentaje de carga cercano al 30 %, la solución de concentración de fertilizante del 1.0 % presenta un porcentaje de carga del 20 % mientras que solución en peso de fertilizante del 0.5%, el porcentaje de carga es de sólo una fracción del 2 %,

La carga del hidrogel aumenta considerablemente con el aumento de la concentración de fertilizante en las soluciones (0.5 %-1.5 %) indicando la disponibilidad de sitios aniónicos “libres” presentes en el hidrogel.

Resultados similares se obtuvieron por Mutar y Kmai, 2012, empleando el hidrogel acrilamida-co- ácido acrílico en donde la carga se incrementa con una mayor concentración de nitrato de sodio empleado como fertilizante.



Imágenes 3(a). De izquierda a derecha, hinchamiento obtenido del hidrogel en agua destilada (blanco) y en solución de fertilizante 1.5 % en peso

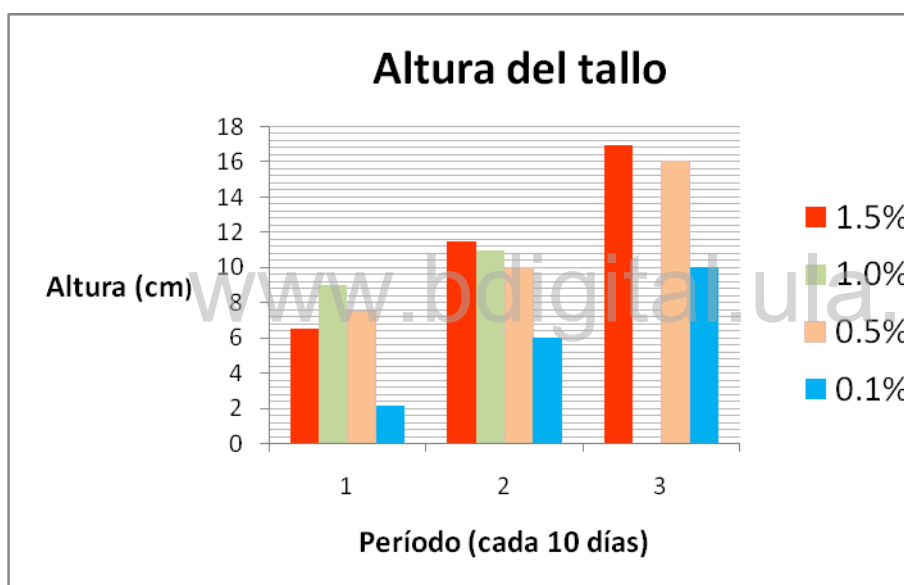


Imágenes 3(b). De izquierda a derecha, fertilizante cargado en la matriz polimérica deshidratada para las soluciones en peso 1.5 % y 0.5 %.

4.- Estudio del desarrollo de la planta de pimiento dulce, *Capsicum frutescens*.

4.1.- Variación de la altura de la altura del tallo

Tabla 4.1 Desarrollo de la altura del tallo			
Solución de fertilizante % (p/p)	Altura (cm)		
	10 Días	20 Días	30 Días
1,50%	6,5	11,5	17,0
1,00%	9,0	11,0	-----
0,50%	7,5	10,0	16,0
0,10%	2,1	6,0	10,0



El gráfico representa la altura del tallo de las plantas (cm), en función del tiempo (a intervalos de 10 días), en donde cada barra representa las concentraciones de fertilizante % p/p en la matriz polimérica.

De ahora en adelante se empleará el término “las plantas de carga de 0.1 %, 0.5 %, 1.0 %, 1.5 %” para hacer referencia a las plantas tratadas con los hidrogeles hinchados en las respectivas soluciones de fertilizante, por abreviación. Tenga en cuenta que esto es diferente a la carga porcentual (% C) que fue determinado en el apartado 3.2.

Las mediciones se tomaron a partir de la primera semana de trasplantada la plantas en el suelo tratado con el fertilizante de liberación lenta correspondiendo al grupo de barras, identificadas con el número “1”

Del gráfico se observa que la altura de las plantas tratadas con el hidrogel hinchado en las soluciones de concentraciones de fertilizante de 0.5 %; 1.0 %; 1.5 %, en peso (plantas de carga 0.5 %; 1.0 %; 1.5 %) varían en el rango de 6-9 centímetros presentando una diferencia marcadamente superior con respecto a la planta tratada con el hidrogel hinchado en la solución de fertilizante de 0.1 % , planta de carga 0.1 %, que presenta una altura de 2.0 cm.

En el segundo periodo (2), la alturas de las plantas de carga 0.5 %, 1.0 % y 1.5 % varían entre los 10-11 cm mientras que la planta de menor carga 0,1% es de 6,0 cm. La planta de carga “0.1 %” presenta un incremento en la altura marcadamente superior (150 %) con respecto al período previo en comparación con el correspondiente incremento de las plantas de carga mayor 0.5 %, 1.0 % y 1.5 %.

En el tercer periodo (3), las plantas mantienen su ritmo de crecimiento alcanzando las alturas de 16,0 cm y 17,0 cm, para las cargas de 1.5 % y 0.5 %, respectivamente; mientras que la planta de carga 0.1 % alcanza la altura de 10 cm. El incremento en la altura del conjunto de plantas es del 60 % con respecto al período previo. La planta de carga 1.0 % muere sin poder registrar su altura de tallo.

Es necesario notar después de la primera semana, que el ritmo de crecimiento de la planta de carga 0.1 % es similar al obtenido para las plantas de carga mayor, 0.5 % y 1.5 %.

Por último, se resalta que la planta tratada solo con hidrogel (blanco) su altura inicial es de 15,0 cm antes de ser trasplantada al suelo tratado solo con hidrogel (fertilizante ausente), la planta mantiene constante su altura de tallo, número de hojas y tamaño de las mismas durante el periodo de supervivencia el cual fue de 4 a 5 semanas.

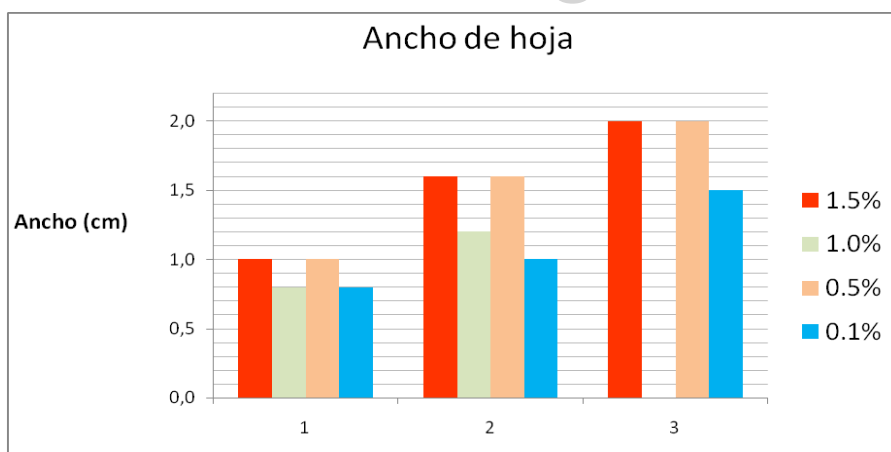
Por último, el periodo de supervivencia de la planta de referencia (sin hidrogel) fue de solo un par de días sin presentar ningún tipo de desarrollo.

Periodo superior a las 4 semanas.

Transcurridos los 30 días, el conjunto de plantas tratadas con el fertilizante de liberación lenta paulatinamente van perdiendo vigor y coloración, empanzando a declinar, observándose un marchitamiento inicial en las puntas de sus hojas presentándose secas y perdiendo su coloración verde intenso. A partir desde este momento en un lapso menor a 10 días, el conjunto de plantas muere sin poder registrar su altura de tallo

4.2.- Variación del ancho de hoja

Tabla 4.2. Desarrollo del ancho de hoja			
Solución de fertilizante p/p	Ancho (cm)		
	10 Días	20 Días	30 Días
1,50%	1,0	1,6	2,0
1,00%	0,8	1,2	-----
0,50%	1,0	1,6	2,0
0,10%	0,8	1,0	1,5



Es importante destacar que el ancho de hoja de las plantas se midió en relación a las 8 hojas formadas en promedio que presento cada una de las plantas.

En la primera semana de trasplantadas las plantas (1) al suelo tratado con el fertilizante de liberación lenta, el ancho de hoja es de 1.0 cm para las plantas de carga 1.5 % y 0.5 %,

mientras que para las plantas de carga 1.0 % y 0.1 %, el ancho de hoja es de 0.8 cm, observándose un desarrollo similar del ancho de hoja para el conjunto de plantas.

En el segundo período (2) se observa un incremento superior del ancho de hoja para las plantas de carga 0.5 % y 1.5 % presentando un ancho de hoja de 1.6 cm, incremento del 60 %, con respecto al periodo previo mientras que la planta de menor carga registra una variación notablemente menor alcanzando un ancho de hoja de 1.0 cm.

En el tercer período (3) se observa un incremento superior del ancho de hoja para la planta de carga 0.1 %, alcanzando un ancho de 1.6 cm, un incremento del 60 %, con respecto al periodo previo; mientras que las plantas de mayor carga alcanzan un ancho de hoja de 2.0 cm un incremento de solo del 25 % con respecto a su periodo previo.

Finalmente, considerando el periodo de supervivencia de las plantas el ancho de hoja para la planta de menor carga es 0.75 %, del valor obtenido para las plantas con mayor carga.

Durante el periodo de supervivencia a pesar que se presenta una diferencia+ del ancho de hoja entre el grupo de mayor carga (2.0 cm) y el de menor carga (1.5 cm), el ritmo de crecimiento de la última se incrementa a partir de la segunda semana. Un efecto similar se observó para la altura de la planta.

El ancho de hoja de la planta tratada solo con hidrogel (blanco) se mantiene constante siendo alrededor de 0.5 cm.

5.- Análisis global del desarrollo de la planta

5.1.- Análisis Cuantitativo

La planta tratada solo con hidrogel se mantiene con vida por un período de tiempo mayor en relación a la planta de referencia “control” sin presentar un desarrollo alguno de sus partes debido a la ausencia de fertilizante. El mantener a la planta por un tiempo mayor demuestra la habilidad que tiene el hidrogel en mejorar las propiedades físicas del suelo.

Considerando la variación global de crecimiento de las plantas durante el periodo de supervivencia, se observa que las plantas de carga 0.5 %, 1.0 % y 1.5 %, tienen un desarrollo superior y muy similar entre sí que difiere notablemente de la planta de menor carga, 0.1 %. Así, transcurridos los 30 días las alturas correspondientes para las plantas de cargas 1.5 % y 0.5 %, son 17 y 16 cm respectivamente, mientras que la altura para la planta 0.1 % de carga es de 10 cm un incremento superior del 50 %, del primer grupo con respecto al último. De lo anterior se tiene que la dosis óptima de carga es del 0.5 % (solución de hinchamiento) sin mostrar un desarrollo superior la planta a concentraciones superiores.

Por otra parte, considerando el periodo de supervivencia en relación a la cantidad de fertilizante en peso contenido en la matriz polimérica, porcentaje de carga % C, se tiene que los hidrogeles hinchados en la solución de fertilizante 1.5 %, presentan un porcentaje de carga del 30 %, mientras que los hidrogeles hinchados en la solución de fertilizante del 0.5 % es del 2.0 %, una diferencia de más del 1000 %, en la cantidad de fertilizante disponible para la planta tratada con la mayor carga, la planta de “1.5 %”. Igualmente considerando el periodo de supervivencia similar de la planta de menor carga 0.1 % y la planta sin fertilizante se confirma que el periodo de supervivencia de las plantas tratadas con el fertilizante de liberación lenta no dependió de la cantidad de fertilizante NPK cargada en la matriz, ya que todas las plantas — “0 %, 0.1 %, 0.5 %, 1.0 %, 1.5 %” — presentan un periodo de supervivencia de cuatro a cinco semanas sino estuvo relacionada con la deficiencia de en la absorción de determinados micronutrientes en el suelo desértico empleado como se verá posteriormente.

5.2.- Análisis cualitativo

El conjunto de plantas tratadas con el fertilizante de liberación lenta durante su etapa de mayor vigor (2 - 3 semanas) presentan una coloración verde tanto en el tallo como en sus primeras hojas formadas a partir del brote terminal (8 hojas por planta aproximadamente), no obstante; las ramificaciones axilares que se empiezan a formar a lo largo del tallo se presentan inicialmente de un color azulado y se tuercen de manera característica hasta secar o marchitar. Igualmente, las nuevas hojas axilares que surgen a partir del tallo marchitan.

Lo anterior ocurre sin afectar la fuerza del tallo que se mantiene erecto ni las hojas antiguas que se mantienen verdes.

Posterior a la cuarta semana, el conjunto de plantas tratadas con el fertilizante de liberación lenta van perdiendo la coloración verde de sus hojas superiores (8 hojas antiguas) con un característico marchitamiento en la punta de las mismas. Además, se observó la pérdida de fuerza o debilitamiento del tallo. Posteriormente, el marchitamiento en la punta de las hojas se expande como una mancha gris-oscuro al interior de la planta en el transcurso de unos pocos días provocando su muerte.

De acuerdo a Savoy, 2014; Bromley, s.f; Alloway, 2008; Dumer, 2013 y Shubert, 1982; el conjunto de síntomas presentados por las plantas es característico de una deficiencia de cobre (principalmente) que se caracteriza porque las hojas antiguas brotadas en el ápice terminal no se ven afectadas mientras que las hojas jóvenes axilares marchitan permanentemente, adquiriendo inicialmente una coloración azulada-verdosa, luego volviéndose cloróticas (amarillas) y finalmente marchitan.

“El marchitamiento permanente de las hojas jóvenes sin afectar el brote terminal es característico de una deficiencia en cobre en la planta” (Savoy, 1999)

“Paralelamente, la alteración de la lignificación de las paredes celulares es el cambio anatómico más típico inducido por la deficiencia de Cu en las plantas superiores. Esto da lugar a la distorsión característica de las hojas jóvenes, a la flexión y torsión de los tallos y al aumento de la susceptibilidad al crecimiento (Marschner, 1995)

De esta forma, se tiene como resultado que la planta presentó una deficiencia en cobre, (principalmente); y manganeso (en menor medida) debido a la sintomatología presentada por la plantas, distinguiéndose notablemente en relación con las deficiencias del resto de micronutrientes y macronutrientes.

La deficiencia de estos micronutrientes en la planta se asocia con los niveles salinos elevados característicos de los suelos desérticos (como se verá a continuación) lo que los

convierte en estériles para el desarrollo de especies hortícolas. Los niveles salinos están relacionados proporcionalmente con la conductividad eléctrica del suelo de forma que las especies hortícolas son muy sensibles a esta variable siendo afectadas negativamente en su desarrollo y supervivencia.

En relación al tipo de suelo empleado del estudio de Ochoa, Malagón, Ernesto y Oballos (2008), encontraron que los suelos correspondientes a la zona seca de San Juan de Lagunillas presentan contenidos medio a altos de Na, K y Mg. y valores de pH ligeramente alcalinos 6.8-7.9, a diferencia del resto de suelos (clasificados como perfiles) que se encuentran en San Juan de Lagunillas

Por otra parte, el empleo de los hidrogeles como acondicionadores del suelo tienen la propiedad de disminuir los niveles salinos del suelo como se encontró del estudio por Aydin, Kant y Duran (2010), concluyendo que el empleo de hidrogeles como acondicionadores del suelo ayudan a mejorar la tolerancia y el crecimiento de un cultivo bajo condiciones salinas.

Por estas series de factores, se encontró en el suelo empleando de San Juan de Lagunillas, que las plantas tratadas con el hidrogel tienen un periodo de supervivencia mayor en relación con la planta empleada como referencia, relacionada a la disminución temporal de los niveles salinos del suelo y la respectiva reducción el stress salino sobre la planta.

Imágenes

5. Análisis global del desarrollo de la planta pimiento dulce, *Capsicum frutescens*.



Imagen 5.1. Visualización de la altura del tallo para la segunda a tercera semana de crecimiento en la etapa vigorosa de las plantas. De izquierda a derecha 1.5 %, 1.0 %, 0.5 % y 0.1 %.



Imagen 5.2. Visualización del ancho de hoja en la segunda a tercera semana de crecimiento de las plantas. De izquierda a derecha 1.5 %, 1.0 %, 0.5 %.



Imagen 5.3. Inicio del decaimiento de las plantas a partir de la cuarta semana. De izquierda a derecha 0.1 %, 0.5 %, 1.5 %. Puntas marchitas y pérdida de la coloración verde de sus hojas. Se puede apreciar que el sustrato se mantiene húmedo.

www.bdigital.ula.ve

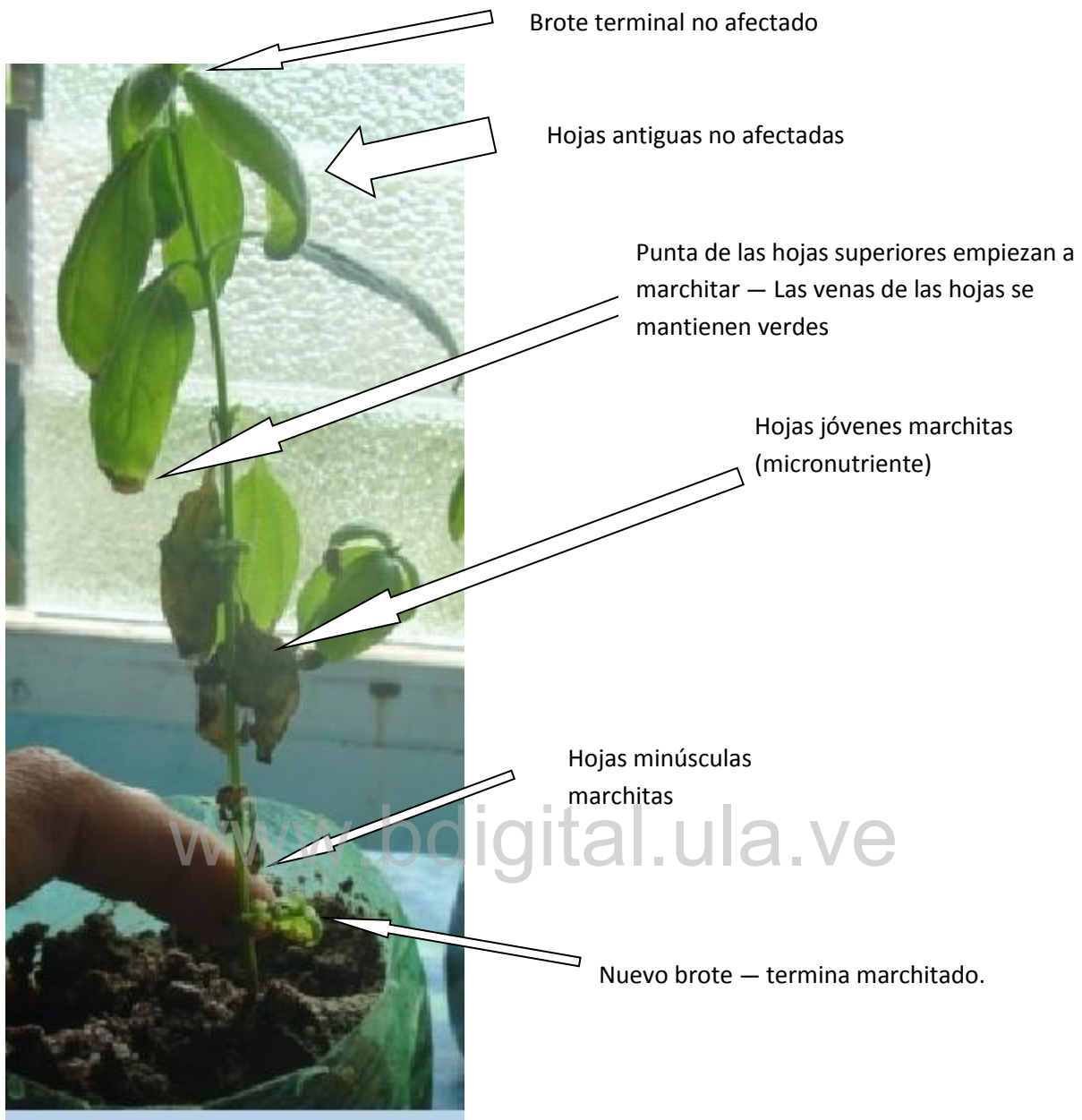


Imagen 5.5. Planta de carga al 0.5 % en la semana quinta. Las hojas superiores corresponden a las hojas antiguas mientras que las hojas axilares (inferiores) corresponden a las nuevas hojas. Se puede observar como las hojas inferiores marchitan sin afectar el brote terminal relacionado a una deficiencia en la toma de cobre y manganeso (micronutrientes).

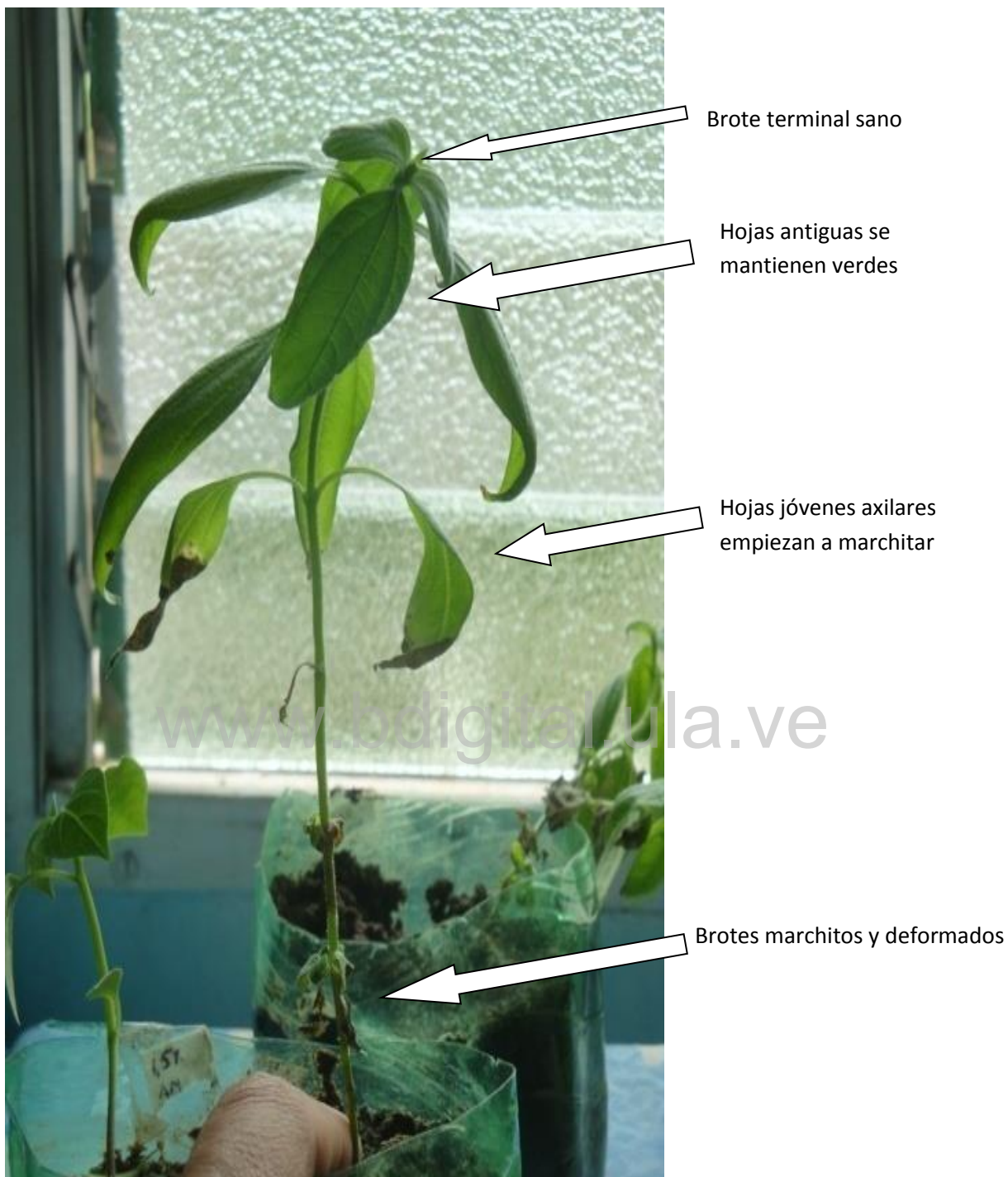


Imagen 5.6. Planta 1.5 %. Durante la segunda semana, se puede observar como la planta mantiene sus hojas superiores verdes mientras que las ramificaciones marchitan o se deforman en la parte baja de la planta.



Imagen 5.7. Planta 1.5 %. recién muerta. Se puede notar que el sistema radicular desarrollado es profundo.



Imagen 5.8. Planta empleada como blanco, antes de ser trasplantada al suelo tratado sólo con hidrogel. La planta se mantiene sin presentar desarrollo o variación de sus partes. Altura constante de 15.0 cm, y ancho de hoja constante de 0.5 cm.



Imagen 5.9. Plantúla muerta sembrada a los pocos días en el suelo arcilloso sin tratamiento alguno “control”



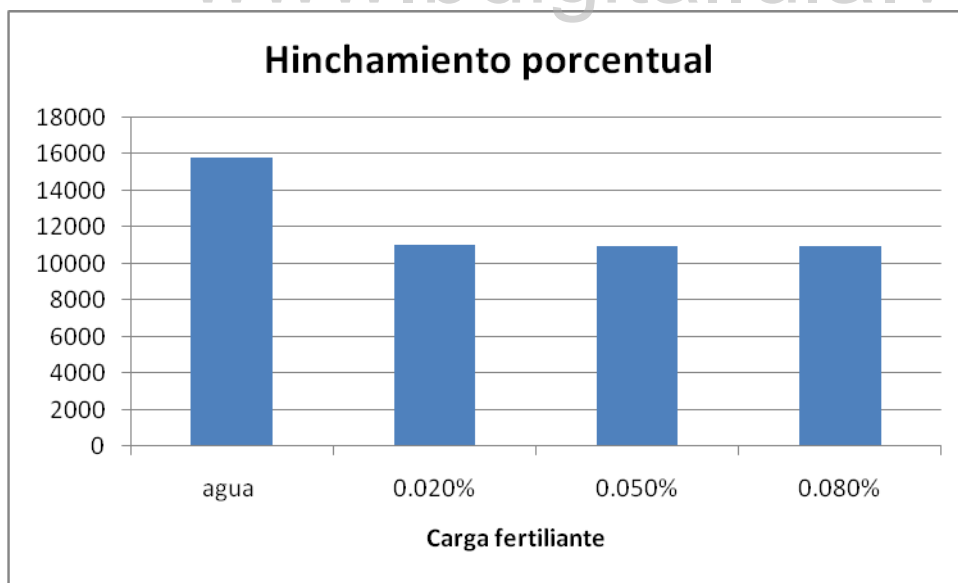
Figura 5.10. La altura máxima alcanzada por la planta 1.5 % fue de 25,0 cm antes de morir a los 40 días. Se puede observar el color grisáceo y marrón que se extiende desde la punta de las hojas hacia el interior de la planta.

6.- En cuanto a la especie frijol rojo, *Vigna umbellata* se obtuvieron los siguientes resultados:

6.1.- Carga del fertilizante en la matriz polimérica

Determinación del radio hinchamiento (% H)

Carga de fertilizante % (p/p)	Peso inicial (aprox.)	Peso final (aprox.)	Radio de hinchamiento
0 %	0.50 g	78.5 g	15700 %
0.020 %	0.50 g	60.0 g	11000 %
0.020 %	0.50 g	60.0 g	11100 %
0.050 %	0.50 g	55.5 g	10990 %
0.050 %	0.50 g	55.4 g	10985 %
0.080 %	0.50 g	55.3 g	10960 %
0.080 %	0.50 g	55.4 g	10970 %



El gráfico representa la variación del hinchamiento porcentual del hidrogel en función de las concentraciones de las soluciones de fertilizante y su relación con el hinchamiento en agua potable.

El radio de hinchamiento del hidrogel comercial en agua potable es cercano al 16000 % mientras que para las soluciones de concentraciones de fertilizante 0.020 %, 0.050 %, y 0.080 %; es de alrededor del 11000 %. El radio de hinchamiento del hidrogel en solución del fertilizante empleadas corresponde a 2/3 partes aproximadamente del radio de hinchamiento en agua potable.

7.- Estudio del desarrollo de la planta de frijol rojo, *Vigna umbellata*

7.1- Desarrollo de la altura de tallo promedio

Semana 1						
Planta	control	blanco	manual	0,020 %	0,500 %	0,080 %
a	3,5	4,0	4,0	4,0	2,0	2,5
b	5,5	5,0	5,5	8,0	5,5	4,0
c	5,0	--	4,5	6,5	4,0	4,5
d	6,0	--	--	7,0	3,5	3,5
promedio	5,0	5,4	4,7	6,4	3,8	3,6
Semana 2						
Planta	control	blanco	manual	0,020 %	0,500 %	0,080 %
a	14,0	13,0	13,5	16,0	13,0	10,0
b	15,0	16,5	12,0	16,0	11,0	8,0
c	14,5	--	11,0	15,0	10,0	11,0
d	15,0	--	--	16,5	11,5	13,0
promedio	14,6	14,3	12,2	15,9	11,4	10,5
Semana 3						
Planta	control	blanco	manual	0,020 %	0,500 %	0,080 %
a	21,0	20,0	25,5	28,0	19,0	20,0
b	22,0	22,5	16,0	23,0	15,0	10,0
c	24,0	21,2	18,0	21,0	14,0	15,0
d	19,0	--	---	21,5	14,0	17,5
promedio	21,5	21,9	19,8	23,4	15,5	15,6
Semana 4						
Planta	control	blanco	manual	0,020 %	0,500 %	0,080 %
a	27,0	25,0	30,0	32,0	22,0	24,0
b	25,5	24,0	19,5	26,0	19,0	12,0
c	29,5	--	22,0	25,0	17,0	17,0
d	21,5	---	--	24,0	15,0	19,0

promedio	25,9	24,5	23,8	26,8	18,3	18,0
Semana 5						
Planta	control	blanco	manual	0,020 %	0,500 %	0,080 %
a	----	26,0	30,0	33,5	22,0	24,0
b	----	24,0	20,0	27,0	19,5	13,0
c	----	----	23,0	26,0	20,0	18,0
d	----	----		28,0	16,0	19,5
promedio	----	25,0	24,3	28,6	19,4	18,6
Semana 6						
Planta	control	blanco	manual	0,020 %	0,500 %	0,080 %
a	----	25,5	30,0	33,5	22,0	24,0
b	----	24,5	20,0	27,0	19,5	13,0
c	----	-----	23,0	26,0	20,0	18,0
d	----	-----		28,0	16,0	19,5
promedio		25,0	24,3	28,6	19,4	18,6

7.2.- Desarrollo de la altura del tallo semanalmente

Planta "a"						
Semana	control	blanco	manual	0,020 %	0,500 %	0,080 %
1	3,5	4,0	4,0	4,0	2,0	2,5
2	14,0	13,0	13,5	16,0	13,0	10,0
3	21,0	20,0	25,5	28,0	19,0	20,0
4	27,0	25,0	30,0	32,0	22,0	24,0
5	-----	26,0	30,0	33,5	22,0	24,0
6	----	25,5	30,0	33,5	22,0	24,0
Planta "b"						
Semana	control	blanco	manual	0,020 %	0,500 %	0,080 %
1	5,5	5,0	5,5	8,0	5,5	4,0
2	15,0	16,5	12,0	16,0	11,0	8,0
3	22,0	22,5	16,0	23,0	15,0	10,0
4	25,5	24,0	19,5	26,0	19,0	12,0
5	-----	24,0	20,0	27,0	19,5	13,0
6	----	24,5	20,0	27,0	19,5	13,0
Planta "c"						
Semana	control	blanco	manual	0,020 %	0,500 %	0,080 %
1	5,0	-----	4,5	6,5	4,0	4,5

2	14,5	-----	11,0	15,0	10,0	11,0
3	24,0	-----	18,0	21,0	14,0	15,0
4	29,5	-----	22,0	25,0	17,0	17,0
5	-----	-----	23,0	26,0	20,0	18,0
6	-----	-----	23,0	26,0	20,0	18,0
Planta "d"						
Semana	control	blanco	manual	0,020 %	0,500 %	0,080 %
1	6,0	----	----	7,0	3,5	3,5
2	15,0	----	-----	16,5	11,5	13,0
3	19,0	----	-----	21,5	14,0	17,5
4	21,5	-----	-----	24,0	15,0	19,0
5	-----	----	-----	28,0	16,0	19,5
6	-----	----	-----	28,0	16,0	19,5

7.3.- Desarrollo de ancho de hoja promedio semanalmente

Semana 2						
	control	blanco	manual	0,020 %	0,50 %	0,080 %
a	2,0	2,0	2,0	2,5	1,8	1,8
b	2,0	2,0	2,0	2,5	1,5	1,3
c	2,0	----	2,0	2,3	1,5	1,5
d	2,3	----	-----	2,5	1,0	1,5
Promedio	2,1	2,0	2,0	2,4	1,4	1,5
Semana 3						
	control	blanco	manual	0,020 %	0,50 %	0,080 %
a	3,0	3,5	3,3	4,0	1,8	1,8
b	3,0	3,0	2,3	3,0	1,8	1,4
c	3,0	----	3,3	4,0	1,8	1,8
d	3,0	----	-----	3,0	1,3	1,8
Promedio	3,0	3,3	2,9	3,5	1,6	1,7
Semana 4						
	control	blanco	manual	0,020 %	0,50 %	0,080 %
a	3,0	4,0	4,0	4,5	2,0	2,0
b	3,8	3,0	2,5	3,5	2,0	1,5
c	3,5	----	4,0	4,5	2,3	2,0
d	3,0	----	----	3,5	1,5	2,5
Promedio	3,3	3,5	3,5	4,0	1,9	2,0

Semana 5						
	control	blanco	manual	0,020 %	0,50 %	0,080 %
a	----	4,5	4,3	4,5	2,0	2,3
b	----	3,5	2,5	3,5	2,3	1,5
c	----	----	4,3	4,8	2,8	2,0
d	----	----	----	4,0	1,5	2,5
Promedio		4,0	3,7	4,2	2,1	2,1
Semana 6						
	control	blanco	manual	0,020 %	0,50 %	0,080 %
a	----	4,5	4,5	4,5	2,0	2,3
b	----	4,5	3,0	3,5	2,3	1,5
c	----	----	4,3	5,5	3,0	2,0
d	----	----	----	4,0	1,5	2,5
Promedio		4,5	3,9	4,4	2,2	2,1

7.4.- Desarrollo del ancho de hoja semanalmente por planta

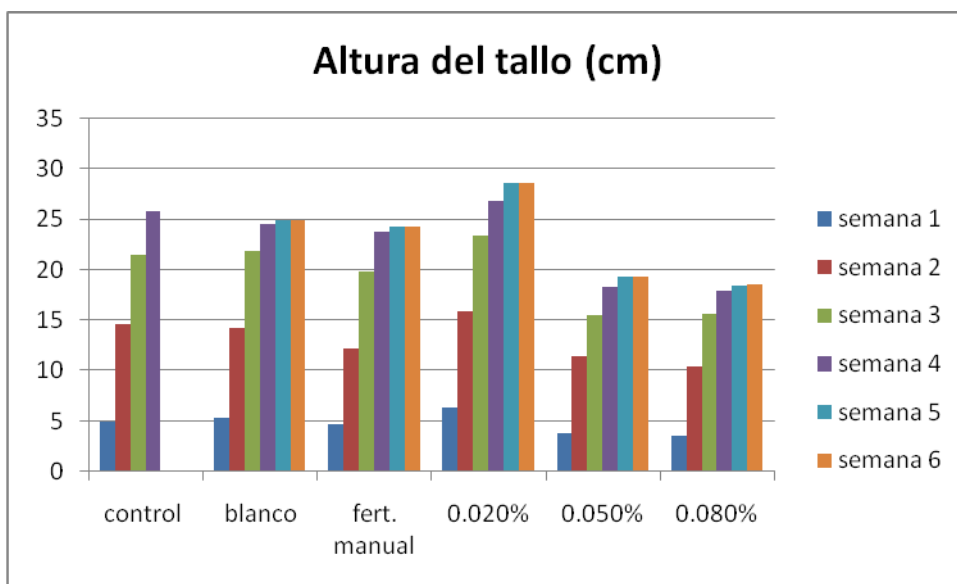
Planta "a"						
Semana	control	blanco	manual	0,020 %	0,50 %	0,080 %
2	2,0	2,0	2,0	2,5	1,8	1,8
3	3,0	3,5	3,3	4,0	1,8	1,8
4	3,0	4,0	4,0	4,5	2,0	2,0
5	----	4,5	4,3	4,5	2,0	2,3
6	----	4,5	4,5	4,5	2,0	2,3
Planta "b"						
Semana	control	blanco	manual	0,020 %	0,50 %	0,080 %
2	2,0	2,0	2,0	2,5	1,5	1,3
3	3,0	3,0	2,3	3,0	1,8	1,4
4	3,8	3,0	2,5	3,5	2,0	1,5
5	----	3,5	2,5	3,5	2,3	1,5
6	----	4,5	3,0	3,5	2,3	1,5
Planta "c"						
Semana	control	blanco	manual	0,020 %	0,50 %	0,080 %
2	2,0	----	2,0	2,3	1,5	1,5
3	3,0	----	3,3	4,0	1,8	1,8
4	3,5	----	4,0	4,5	2,3	2,0

5	----	-----	4,3	4,8	2,8	2,0
6	----	-----	4,3	5,5	3,0	2,0
Planta “d”						
Semana	control	blanco	manual	0,020 %	0,50 %	0,080 %
2	2,3	-----	----	2,5	1,0	1,5
3	3,0	----	----	3,0	1,3	1,8
4	3,0	-----	----	3,5	1,5	2,5
5	----	-----	----	4,0	1,5	2,5
6	----	----	----	4,0	1,5	2,5

8.- Análisis de resultados de la parte experimental, planta de frijol rojo, Vigna umbellata.

Variación de la altura del tallo promedio

	Altura del tallo, cm. (valor promedio)					
	control	blanco	Fertilización manual	0.020 %	0.050 %	0.080 %
semana 1	5,0	5,4	4,7	6,4	3,8	3,6
semana 2	14,6	14,3	12,2	15,9	11,4	10,5
semana 3	21,5	21,9	19,8	23,4	15,5	15,6
semana 4	25,9	24,5	23,8	26,8	18,3	18,0
semana 5	----	25,0	24,3	28,6	19,4	18,5
Semana 6	----	25,0	24,3	28,6	19,4	18,6



En la primera semana de desarrollo de las plantas: control, blanco y fertilización manual presentan una altura cercana a los 5.0 cm mientras que las plantas tratadas con el hidrogel cargado de fertilizante al 0.020 % presentan una altura de 6.4 cm. La altura que presentan las plantas con una carga de fertilizante al 0.050 % y 0.080 % es de 3.8 y 3.6 cm, respectivamente.

En la segunda semana de crecimiento se observa el mayor incremento en la altura para el conjunto de plantas. La altura de las plantas de carga al 0.020 % es de 16.0 cm, las plantas control y blanco presentan una altura cercana a los 15.0 cm, y las plantas fertilizada manualmente presentan una altura de 12.2 cm. Por último, se tiene que las plantas de carga al 0.050 % y 0.080 % presentan una altura marcadamente inferior cercana a los 10 cm.

La tercera semana se caracteriza por un incremento en una menor proporción de la altura del tallo para el conjunto de plantas con respecto a la semana previa. Las plantas de carga al 0.020 % presenta una altura de 23.4 cm mientras que las plantas control, blanco y fertilizada manualmente presentan una altura similar de 21.5 cm, 21.9 cm, 19.8 cm, respectivamente. La altura de las plantas de carga 0.020 % y 0.050 % es de 15.5 cm para ambas.

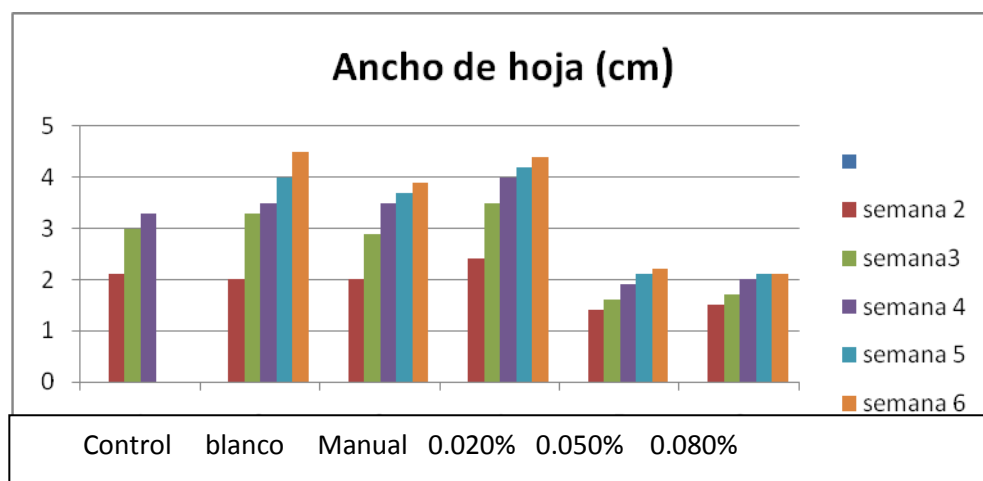
En la cuarta semana el ritmo de crecimiento de la altura de tallo del conjunto de plantas disminuye con un incremento en la altura en un 20 % aproximadamente con respecto a la semana previa. Las plantas al 0.020 % presenta la mayor altura 26.8 cm, mientras que las

alturas de las plantas control: 25.9 cm, blanco: 24.5 cm, y fertilización manual: 23.8 cm. Las plantas de carga al 0.050 % y 0.080 % alcanzan una altura aproximada de 18.0 cm.

En la quinta semana el incremento de la altura para el conjunto de plantas es marcadamente inferior siendo sólo del 10 %, aproximadamente con respecto a la semana previa. La altura de las plantas de carga al 0.020 %, es de 28.6 cm siendo superior a las alturas alcanzada por la planta blanco de 25.0 cm y fertilización manual de 24.3 cm. Las plantas con las cargas de 0.050 % y 0.080 % alcanzan una altura marcadamente inferior cercana a los 20 cm.

7.2.- Variación del ancho de hoja promedio

Variación del ancho de hoja (promedio)						
	Cm					
	control	blanco	manual	0,002 %	0,005 %	0,008 %
semana 2	2,1	2,0	2,0	2,4	1,4	1,5
semana3	3,0	3,3	2,9	3,5	1,6	1,7
semana 4	3,3	3,5	3,5	4,0	1,9	2,0
semana 5	--	4,0	3,7	4,2	2,1	2,1
Semana 6	--	4,5	3,9	4,4	2,2	2,1



Las hojas de las plantas se caracterizan por ser de forma de corazón y presentarse por pares (hojas medidas) mientras que las hojas más jóvenes presentan un ancho de hoja considerablemente inferior.

En la segunda semana, las plantas de carga al 0.020% presenta el mayor ancho de hoja de 2.4 cm, mientras que las plantas control, blanco y fertilización manual presentan un ancho de hoja de 2.0 cm. Las hojas de las plantas de carga al 0.050 % y 0.080 % presentan un tamaño considerablemente inferior de 1.4 cm y 1.5 cm, respectivamente.

En la tercera semana se mantiene el ritmo de crecimiento del ancho de hoja para el conjunto de las plantas con respecto a las semanas anteriores. Las plantas de carga al 0.020 % presenta un ancho de hoja de 3.5 cm mientras que la plantas blanco presenta un ancho de hoja similar de 3.3 cm. Las plantas control y fertilización manual presentan el mismo ancho de hoja de 3.0 cm. El ancho de hoja para las plantas de carga al 0.050 % y 0.080 % es de 1.6 cm y 1.7 cm, respectivamente.

En la cuarta semana se puede apreciar una disminución en el desarrollo del ancho de hoja con respecto a la semana previa para el conjunto de plantas a excepción de la planta blanco. Las plantas de carga al 0.020 % y blanco presentan el mismo ancho de hoja de 4.0 cm. Por otra parte, las plantas control y fertilización manual presentan el mismo ancho de hoja de 3.5 cm. Las plantas de carga al 0.050 % y 0.080 % presentan un ancho de hoja aproximado de 2.0 cm.

La quinta semana se acentúa aún más la disminución en el desarrollo del ancho de hoja con respecto a la semana previa con la misma excepción de las plantas blanco. Las plantas de carga al 0.020 % y blanco alcanzan un ancho de hoja de 4.2 cm y 4.5 cm, respectivamente, diferenciándose del menor ancho de hoja alcanzado por las plantas fertilizadas manualmente de 3.7 cm. Las plantas de carga 0.050 % y 0.080 % presentan el mismo ancho de hoja de 2.0 cm

7.3.- Análisis Global. Desarrollo de la planta

Considerando el desarrollo de altura de tallo alcanzado durante el periodo de tiempo de cuatro semanas, la plantas al 0.020 % presentan la mayor altura promedio de 26.8 cm

siendo superior en +3.5 % con respecto a la altura promedio alcanzadas por las plantas control (25.9 cm), mientras que la plantas blanco (25.0 cm) y las plantas fertilizadas manualmente (24.3 cm) presenta una diferencia de altura de -5.4 % y -8.1 % con respecto a las plantas control.

De los resultados obtenidos se observa que las plantas tratadas de manera aparte con hidrogel (blanco) y fertilizante (fertilización manual) no muestran un desarrollo superior de la altura con respecto a las plantas control.

Resultados similares fueron obtenidos por Carneiro et al. (2016), que encontraron que a pesar del efecto ligeramente positivo del hidrogel en el desarrollo de la especie *Yellow lantern chili*, los valores promedio del crecimiento no muestra diferencias significativas con y sin hidrogel. Igualmente, no encontraron efecto alguno en la dosis de nitrógeno sobre la altura de la planta.

Considerando el ancho de hoja promedio alcanzado en el periodo de 6 semanas, se tiene que la planta tratada con la carga al 0.020% presenta un ancho de hoja de 4.2 cm siendo superior en un +13.5 % en relación con la planta fertilizada manualmente (3.7 cm), mientras que la plantas blanco presenta un ancho de hoja de 4.5 cm siendo superior en +22.0 %. De los resultados obtenidos, se observa que el empleo del hidrogel presenta un efecto positivo sobre el tamaño de hoja asociado al mejoramiento de las condiciones físicas del suelo.

Por último, en relación con las plantas tratadas con las cargas de 0.050 % y 0.080 % de fertilizante en hidrogel, las mismas se ven afectadas negativamente tanto en el desarrollo de la altura del tallo como del ancho de hoja como consecuencia del efecto de una concentración alta de fertilizante en el suelo por lo que la matriz polimérica no actúa como reservorio o fertilizante de liberación lenta.

Imágenes

Desarrollo de la planta frijol rojo, *Vigna umbellata* en la semana cuarta

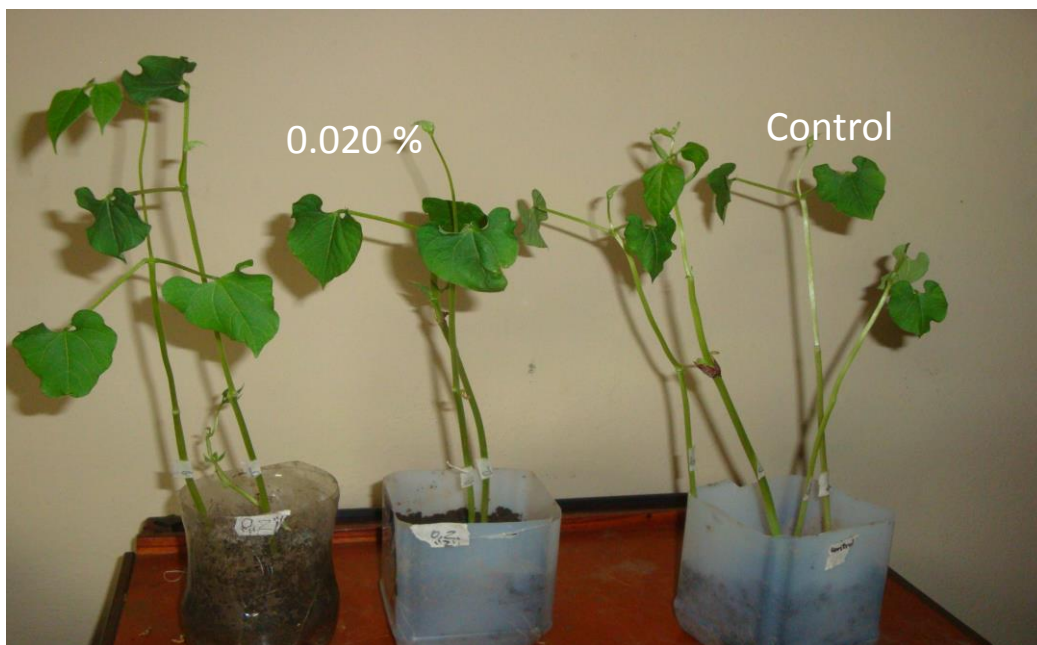


Imagen 7.1- Las plantas control tienen un tallo débil y un ancho de hoja inferior con respecto a la planta tratada con hidrogel y fertilizante.

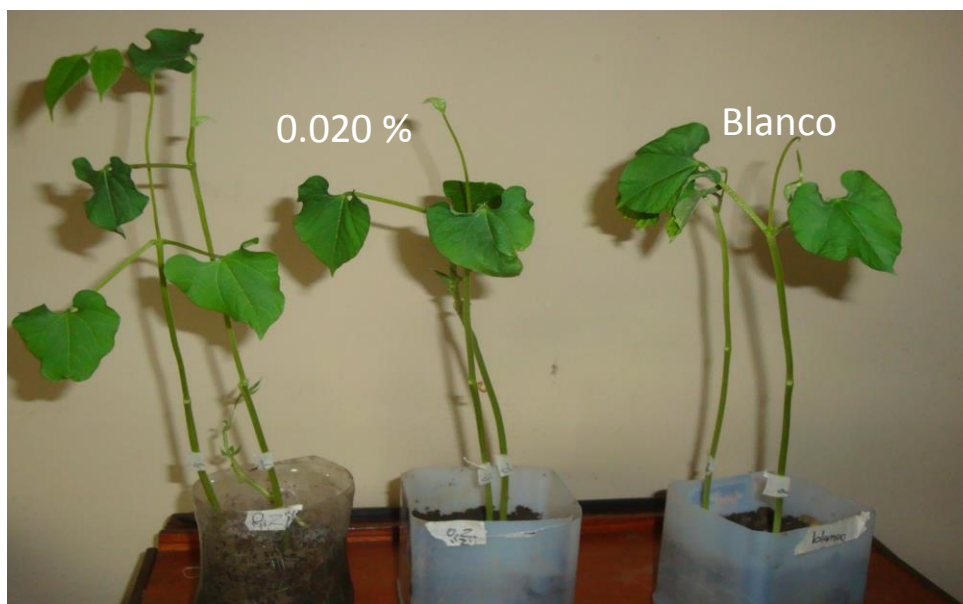


Imagen 7.2- Las plantas tratadas solo con hidrogel, presenta un desarrollo similar tanto en la altura como en el ancho de hoja con respecto a las plantas tratadas con hidrogel y fertilizante.

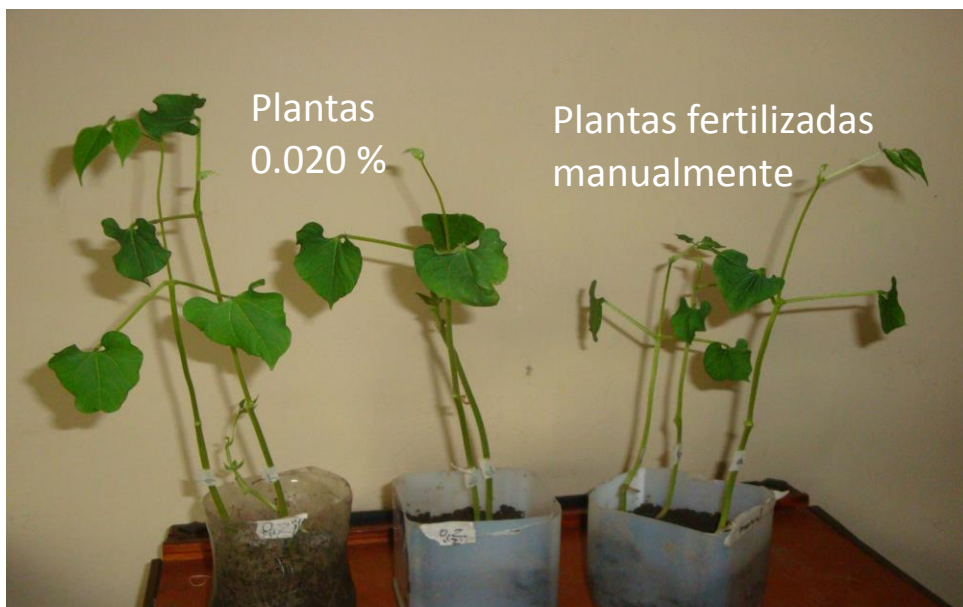


Imagen 7.3- Las plantas fertilizadas manualmente presentan un ancho de hoja notablemente inferior con respecto a las plantas tratadas con hidrogel y fertilizante.

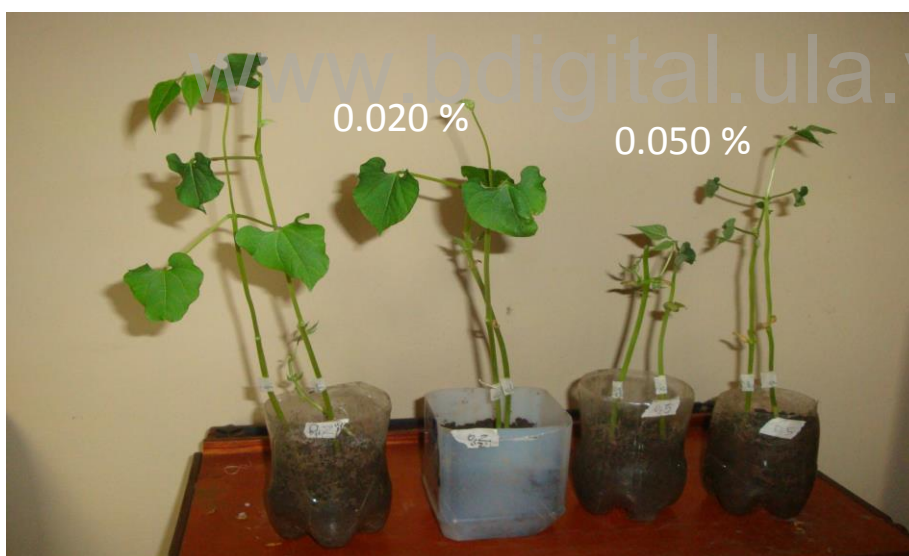


Imagen 7-4. Las plantas con hidrogel de carga al 0.050 % en peso de fertilizante se atrofian debido a un exceso de fertilizante en el medio por lo que la matriz no actúa como fertilizante de liberación lenta.

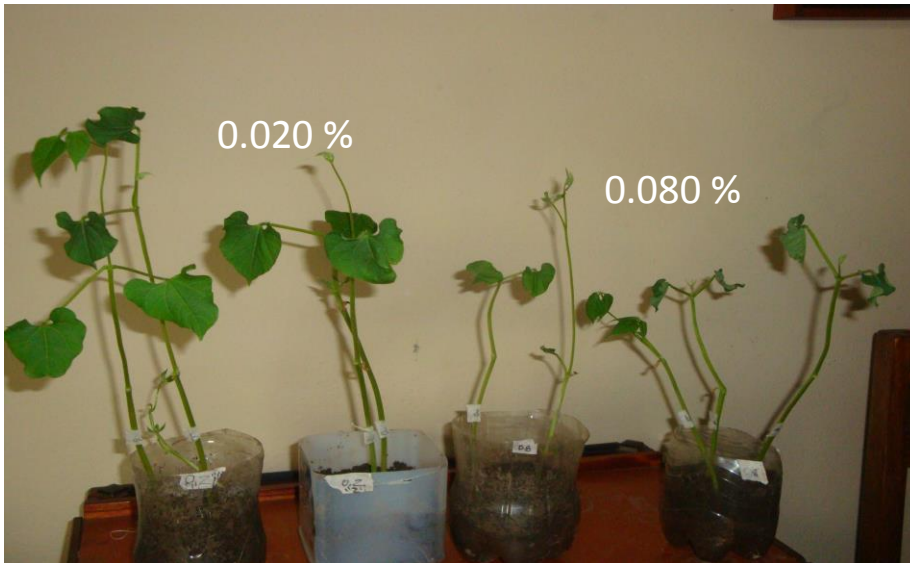


Imagen 7-5. Las plantas con hidrogel de carga al 0.080 % en peso de fertilizante se atrofian debido a un exceso de fertilizante en el medio por lo que la matriz no actúa como fertilizante de liberación lenta.

www.bdigital.ula.ve

Conclusiones

El periodo de supervivencia de la planta de pimiento dulce del género *Capsicum frutescens* tratada con el hidrogel acrilamida co-ácido maléico (80:20) es significativamente mayor (4-5 semanas) en relación a la planta sembrada sin ningún tipo de tratamiento en el suelo arcilloso de la zona seca de San Juan de Lagunillas.

La muerte del conjunto de plantas tratadas con el fertilizante de liberación lenta estuvo asociada con la salinidad característica del suelo de la zona seca de San Juan de Lagunillas conllevando a la deficiencia en la toma de micronutrientes específicos como el cobre y manganeso por la planta.

El desarrollo de las plantas tratadas con el fertilizante de liberación lenta para las concentraciones de 1.5%, 1.0% y 0.5% presentan una altura del tallo y ancho de hoja marcadamente superior (60%) en relación con la planta de menor carga, 0.1%.

El análisis térmico DTGA y DSC, indica que el fertilizante de liberación lenta de matriz polimérica acrilamida co-ácido maléico presenta una estabilidad térmica superior a la requerida para su aplicación en la agricultura.

El análisis por espectroscopia infrarroja (FT-IR), confirma la presencia de los grupos funcionales presentes en el copolímero acrilamida co-ácido maléico.

El hinchamiento del hidrogel de pañales comerciales Pannpaos® es del 16000 % en agua potable disminuyendo su hinchamiento en 2/3 partes en la solución de fertilizante comercial Fetiagro®.

El empleo por separado del hidrogel de pañales comerciales Pannpaos® y del fertilizante Fetiagro®, para el tratamiento del suelo no influye en el incremento de la altura del tallo de la planta *Vigna umbellata*, no obstante, el hidrogel influye positivamente en el tamaño del ancho de hoja de la planta.

El hidrogel de pañales comerciales Pannpaos[®], no actúa como fertilizante de liberación lenta.

www.bdigital.ula.ve

Bibliografía

- Ahmed, E. M. (2015). Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review. *Journal of Advanced Research*, 6, 105–121. DOI: /10.1016/j.jare.2013.07.006
- Aydin, A; Kant, C; and Turan M. (2011) Hydrogel substrate alleviates salt stress with increase antioxidant enzymes activity of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under salinity stress. *African Journal of Agricultural Research* Vol. 6(3), pp. 715-724. DOI: 10.5897/AJAR10.648
- Azeem, B., KuShaari, K., Man, Z., Basit, A., y Thanh, T. (2014). Review on materials and methods to produce controlled release coated urea fertilizer [Archivo PDF]. *Journal of Controlled Release*, 181, 11-21. doi: 10.1016/j.jconrel.2014.02.020
- Alloway, B. (2008). Micronutrient Deficiencies in Global Crop Production. *Springer Science & Business Media*. ISBN 978-1-4020-6860-7.
- Bajpai, S. (2001) Swelling–deswelling behavior of poly(acrylamide-co -maleic acid) hydrogels. *Journal of Applied Polymer Science* 80(14):2782 – 2789. DOI: 10.1002/app.1394
- Bakass, M., Mokhlisse, A. y Lallemand, M. (2002). Absorption and desorption of liquid water by a superabsorbent polymer: Effect of polymer in the drying of the soil and the quality of certain plants [Archivo PDF]. *J. Appl. Polym. Sci.*, 83, 234-243. DOI: 10.1002/app.2239
- Baker, B. Types of soils according to color. Recuperado 20 Julio 2019, de <https://www.hunker.com/13406895/types-of-soils-according-to-color>
- Baligar, V. C., Fageria, N. K., Eswaran, H., Wilson, M. J. y Zhenli, H. (2004). *Nature and Properties of Red Soil of the World*. DOI:10.1007/978-1-4020-2138-1_2
- Bhat, N. R., Suleiman, M. K. y Abdal M. (2009). Selection of crops for sustainable utilization of land and water resources in Kuwait, *World J. of Agric. Sci.*, 5(2), 201-206. <https://pdfs.semanticscholar.org/9619/159e2be13e9d49470e7651480086fcd30250.pdf>

Bajpai, A. K. y Giri, A. (2002). Swelling dynamics of a macromolecular hydrophilic network and evaluation of its potential for controlled release of agrochemicals, *Reactive & Functional Polymers*, 53, 125–141. DOI: 10.1016/S1381-5148(02)00168-2

Bromley. (n.d.). Nutrient Deficiency Symptoms [Archivo PDF]. *Rutgers Master Gardeners of Mercer County*. <https://mgofmc.org/docs/nutrientdeficiency.pdf>

Carneiro, L., Junior, R., Carvalho, F., Nascimento, M., Xavier, R., y Benett, K. (2016). Effects of nitrogen fertilization and hydroretentor gel application in *Capsicum* spp. cultivation. [Archivo PDF]. *Australian Journal Of Crop Science*, 10(10), 1399-1403. DOI:10.21475/ajcs.2016.10.10.pne56

Carraher, C.H. (ed.).2003. *Polymer Chemistry*. [https://hysz.nju.edu.cn/wangxl/download-polymer/Polymer%20Chemistry%20\(Carraher\).pdf](https://hysz.nju.edu.cn/wangxl/download-polymer/Polymer%20Chemistry%20(Carraher).pdf).

Das, N. (2013). Preparation methods and properties of hydrogels: a review, *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 5(3). <http://www.thepharmajournal.com/archives/2017/vol6issue6/PartA/6-5-33-916.pdf>

Ding, H., Zhang, Y., Li, W., Zheng, X., Wang, M., Tang, L., y Chen, D. (2016). Nutrients Release from a Novel Gel-Based Slow/Controlled Release Fertilizer. [Archivo PDF]. *Applied And Environmental Soil Science*, 2016, 1-13. DOI: 10.1155/2016/2013463

Durner, E. (2013). *Principles of Horticultural Physiology*. CABI. ISBN 978-1-78064-306-9.

Ebara, M., Kotsuchibashi, Y., Narain, R., Idota, N., Kim, Y.-J., Hoffman, J.M., Uto, K. y Aoyagi, T. (2014). *Smart Biomaterials*. DOI: 10.1007/978-4-431-54400-5_2

Ebewele, R. O. (2000). *Polymer Science and Technology*. <http://chemistry-chemists.com/chemister/Polimers/polymer-science-and-technology.pdf>

El Rehim, H.A, Hegazy, E. S. y El Mohdy, H. L. (2004). Radiation synthesis of hydrogels to enhance sandy soils water retention and increase performance, [Archivo PDF] *J. Appl. Polym. Sci.*, 93 1360-1371. DOI: /10.1002/app.20571

Ekebafé, L., Ogbeifun, D., y Okieimen, F. (2011). Polymer Applications in Agriculture. [Archivo PDF]. *Biokemistri*, 23(2), 81-89. <http://www.bioline.org.br/pdf?bk11011>

Ochoa, G; Malagón,D; Ernesto, P; y Oballos, J (2008). Caracterización morfológica, química y mineralógica de suelos de la región andina venezolana. (2009) Revista Geográfica Venezolana, Vol. 51(1) 2010, 31-44

Guo, M., Liu, M., Hu, Z., Zhan, F. y Wu, Lan. (2005). Preparation and properties of a slow-release membrane encapsulated urea fertilizer with superabsorbent and moisture preservation, *Ind. Eng. Chem. Res.* 44 (12), 4206–4211. DOI: 10.1021/ie0489406

Hoare, T. R. y Kohane, D.S. (2008). Hydrogels in drug delivery: Progress and challenges, *Polymer*, 49(8), 1993–2007. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2008.01.027>

Hoffman, A.S. (2012). *Hydrogels for biomedical applications*. DOI:/10. 1016/j.addr.2012.09.010

Hong, J., Lee, J., Rhym, Y.-M., Kim, D. –H., y Shim, S. E. (2010). Polyelectrolyte-assisted synthesis of polystyrene microspheres by dispersion polymerization and the subsequent formation of silica shell, *J. Colloid Interface Sci.*, 344(2): 410-416. DOI: 10.1016/j.jcis.2010.01.001

Horta, A. (1994). *Macromoleculas*. Madrid, España: Universidad Nacional de Educación a Distancia UNED.

Karadağ, E., Üzümlü, Ö., y Saraydin, D. (2002). Swelling equilibria and dye adsorption studies of chemically crosslinked superabsorbent acrylamide/maleic acid hydrogels. [Archivo PDF]. *European Polymer Journal*, 38(11), 2133-2141. doi: 10.1016/s0014-3057(02)00117-9

Katime, I., Katime, O., y Katime, D. (2003). *Los Materiales Inteligentes de éste milenio: Los hidrogeles macromoleculares. Síntesis, propiedades y aplicaciones*. Bilbao, España: Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco.

Katime, I. (1994). *Química Física Macromolecular*. Bilbao, España: Servicio Editorial Universidad del País Vasco

Liu, G., Zotarelli, L., Li, Y., Dinkins, D., Wang, Q. y Ozoires-Hampton, M. (2017). Controlled-Release and Slow-Release Fertilizers as Nutrient Management Tools, (HS1255) 1-6 <https://edis.ifas.ufl.edu/pdffiles/HS/HS125500.pdf>

Liu, M., Liang, R., Zhan, F. Z., y Niu, A. (2007). Preparation of superabsorbent slow release nitrogen fertilizer by inverse suspension polymerization, *Polymer International*, 56(6), 729–737. DOI: /10.1002/pi.2196

Mahdavinia, G.R. y Mousavi S.B. (2009). Synthesis of porous poly(acrylamide) hydrogels using calcium carbonate and its application for slow release of potassium nitrate, *Express polymer letters* 3(5), 279-285. DOI: 10.3144/expresspolymlett.2009.35

Maitra, J. y Shukla, V. (2014). Crosslinking in hydrogels: A review. [Archivo PDF]. *American Journal of Polymer Science*, 4(2), 25-31. DOI: 10.5923/j.ajps.20140402.01

Marković G., Marinović-Cincović, M., Jovanović, V., Samaržija-Jovanović S. y J. Budinski-Simendić. *Polymer science: research advances, practical applications and educational aspects*, 397-403. <https://pdfs.semanticscholar.org/51c9/edc5904ad84808ad298f1e882eb2f9dfef1d.pdf>

Márquez, A. (2016). Estudio de absorción de un fármaco en hidrogeles semi- IPN simultáneos, en forma de microesferas. Tesis de grado, Ciencias-ULA.

Milani, P., França, D., Balieiro, A., y Faez, R. (2017). Polymers and its applications in agriculture. [Archivo PDF]. *Polímeros*, 27(3), 256-266. doi: 10.1590/0104-1428.09316

Murthy, S. (2004). Recent developments in polymer characterization using X-ray diffraction, *The rigakuJournal*, 21 (1), 15-24.

Mutar, M. y Kmai, R. (2012). Preparation of copolymer of acrylamide and acrylic acid and its application for slow release sodium nitrate fertilizer, 17, 71-83. [Archivo PDF]. <https://www.iasj.net/iasj?func=fulltext&aId=130165>

Ni, B., Liu, M. (2009). Multifunctional Slow-Release Urea Fertilizer from Ethylcellulose and Superabsorbent Coated Formulations, *Chem. Eng. J.*, 155, 892–898

Pal, K., Banthia, A., y Majumdar, D. (2009). Polymeric hydrogels: Characterization and biomedical applications: A minireview [Archivo PDF]. *Design monomers and polymers*, 12, 197-220. <http://dspace.nitrkl.ac.in:8080/dspace/handle/2080/1148>

Puoci, F., Lemm, A., Spizzirri, U., Cirillo, G., Curci, M., y Picci, N. (2008). Polymer in agriculture: A review, *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, 3(1), 299-314.
<https://pdfs.semanticscholar.org/32e0/0b38f13a97511069de6f3e4a01e44dcd2899.pdf>

Quintero, L. (2013). Microesferas de hidrogeles acrílicos, para la extracción en fase sólida de metales pesados. Tesis de grado, Ciencias-ULA.

Rabat, N., Hashim, S., y Majid, R. (2016). Effect of Different Monomers on Water Retention Properties of Slow Release Fertilizer Hydrogel. [Archivo PDF]. *Procedia Engineering*, 148, 201-207. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.573

Rahman, M., Das, B., Miah, M., y Ahmad, H. (2008). Fixation of urea to poly(acrylamide-maleic acid) and nitrogen release behaviour of the product: A comparison with urea and control, *Bulg. J. Agric. Sci*, 14: 373-380. <https://www.Agrojournal.org/14/04-04-08.pdf>

Ramos, G. (1999). Determinación de funciones de producción y comportamiento del cultivo de la cebolla bajo diferentes láminas de riego y dosis de fertilización fosforada en San Juan de Lagunillas, Mérida, Venezuela [Archivo PDF]. *Rev. Fac. Agron. LUZ*, 16, 38-51.

Shavit, U., Shaviv, A., Shalit, G., y Zaslavsky, D. (1997). Release characteristics of a new controlled release fertilizer. [Archivo PDF]. *Journal of Controlled Release*, 43(2-3), 131–138. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(01\)71011-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(01)71011-5)

Shukla, S., Hanlon, E. A., Jaber, F. H., Stoffella, P. J., Obreza, T. A., y Ozores-Hampton M. (2013). Ground water nitrogen: Behavior in flat woods and gravel soils using organic amendments for vegetable production. [Archivo PDF]. *UF/IFAS North Florida Research Center*. <http://edis.ifas.ufl.edu/ae400>

Reetz, H.F. (2016). *Fertilizers and their efficient use*. Paris, Francia:IFA.https://www.fertilizer.org/images/Library_Downloads/2016_ifa_reetz.pdf

Rudzinski, W. E., Dave, A. M., Vaishnav, U. H., Kumbar, S. G., Kulkarni, A. R. y Aminabhavi, T. M. (2002). Hydrogels as controlled release devices in agriculture [Archivo PDF]. *Designed Monomers and Polymers*, 5(1), 39-65, DOI: 10.1163/156855502760151580

Savoy, H. (1999). *Fertilizers and Their Use* [Archivo PDF]. The University of Tennessee Knoxville. <https://trace.tennessee.edu/>

Sempeho, S., Kim, H., Mubofu, E., yHilonga, A. (2014). Meticulous Overview on the Controlled Release Fertilizers. [Archivo PDF]. *Advances In Chemistry*, 2014, 1-16. doi: 10.1155/2014/363071

Shetye, P., Godbole, A., Bhilegaoka, S. y Gajare, P. (2015). Hydrogels: Introduction, Preparation, Characterization and Applications [Archivo PDF]. *Human Journals* 1(1), 47-71. <https://www.ijrm.humanjournals.com>

Swarbrick, J. (2013). *Encyclopedia of Pharmaceutical Science and Technology*, North Carolina, USA: CRC Press

Schubert, T. (1982). Copper Deficiency of Plants. *Florida Department of Agriculture and Consumer*

Services.www.fda.gov/content/download/4675/file/Copper%20Deficiency%20of%20Plants.pdf.

Tao, S. (2011). Preparation and characterization of triple polymer coated controlled release urea with water retention property and enhanced durability, *J. Appl. Polym. Sci.*, 120(4), 2103–2111.<https://doi.org/10.1002/app.33366>

Trenkel, M. E. (2010). *Slow and controlled release and stabilized fertilizers: An option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture*. Paris, Francia: International Fertilizer Industry Association (IFA)https://www.fertilizer.org/images/Library_Downloads/2010_Trenkel_slow%20release%20book.pdf

Turakhiya J. M, Savani, H. D., Patel, J. M., Akbari, B. V., Prajapati, N. G. y Shah, V. S. (2013). Review superporous hydrogel (SPH): An approach for controlled drug delivery, *Univ J Pharm*, 2(1), 47–58.

Ullah, F., Othman, M.B., Javed, F., Ahmad, Z. y Akil, H. (2015). Classification, processing and application of hydrogels: a review, *Materials Science and Engineering C*, 57, 414-433.<https://doi.org/10.1016/j.msec.2015.07.053>

Vashist, A., Gupta, Y.K y Ahmad, S. (2012). Interpenetrating biopolymer network based hydrogels for an effective drug delivery system, *Carbohydrate Polymers*, 87(2), 1433-1439.<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.09.030>

Wade, L.G. (2008). *Química Orgánica* (5ta. Ed). Madrid, España: Pearson Prentice Hall. 1114-1160

Zhang, Y. (2009). Preparation of copolymers of acrylic acid and acrylamide for copper (II) capture from aqueous solution.[Archivo PDF]. Waterloo, Canada: UWSPACE<https://uwspace.uwaterloo.ca/handle/10012/4822>

Zohuriaan, M. J., Omidian, H. y Kabiri, K. (2010). Advances in non-hygienic applications of super absorbent hydrogel materials, *Journal of Materials Science*, 45(21), 5711-5735.