

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL



Efecto de Tres Proporciones de Hidrogel en la Retención de Humedad en Dos Sustratos para
la Producción de Planta en Vivero.

Por:

MIRIAM JOSELIN CERDA MORA

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre de 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL

Efecto de Tres Proporciones de Hidrogel en la Retención de Humedad en Dos Sustratos para
la Producción de Planta en Vivero.

Por:

MIRIAM JOSELIN CERDA MORA

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Aprobada por el Comité de Asesoría:



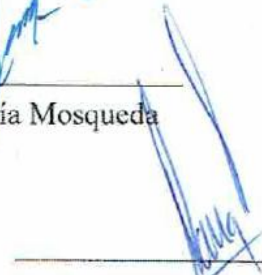
Ing. Sergio Braham Sabag
Asesor principal



Dr. Genaro Esteban García Mosqueda
Co-Asesor



M.C. Melchor García Valdez
Co-Asesor



Dr. Alberto Sandoval Rangel
Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México

Diciembre de 2025

DERECHOS DE AUTOR Y DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

El autor principal quien es el responsable directo, jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos.

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

Por lo anterior me responsabilizo de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaro que este trabajo es original.



Miriam Joselin Cerda Mora

DEDICATORIA

A mis padres, Claudia Rocío Mora Vázquez y Omar Eduardo Cerda Gamboa, por su amor incondicional y por apoyarme en todos los aspectos de mi vida. Gracias por animarme siempre, por creer en mis decisiones, por impulsarme a cumplir mis sueños y por acompañarme en cada paso.

A mi abuela, María de la Luz Vázquez Ortiz, por su amor, sus oraciones y su presencia en mi vida. Gracias por creer en mí, por acompañarme con su fe en todo momento y por alentarme siempre a salir adelante.

A mi tío, Jesús Antonio Mora Vázquez, agradezco sinceramente su apoyo y la manera en que ha acompañado mi camino académico. Su consideración y respaldo forman parte de este logro.

AGRADECIMIENTOS

A la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro**, por convertirse en mi segunda casa y permitirme formar parte de esta institución. Gracias por brindarme una formación académica integral y por darme la oportunidad de convivir, relacionarme y conocer a personas que marcaron positivamente esta etapa

A mis asesores, **Ing. Sergio Braham Sabag, Dr. Genaro Esteban García Mosqueda, y M.C. Melchor García Valdez**, por compartir conmigo su experiencia, orientación paciencia y dedicación, pues su apoyo y sus conocimientos fueron determinantes para el desarrollo de esta investigación y la culminación de mi formación profesional.

A **Dios**, por darme la oportunidad de llegar a esta etapa de mi vida y por hacer posible todo aquello que en su momento anhele.

A mis **Hermanos**, Ximena, Evelin y Mario, por su apoyo, su cariño, y por los buenos y malos momentos que me hicieron pasar en este periodo.

A mis **Amigos**, Blanca Badillo, Braulio Cerón, Arturo García, Dalia Magdaleno, Renata Sánchez, Derli Velazco, José Galarza, Marco Argueta y a todos aquellos que formaron parte de mi vida, pero por falta de espacio no los mencione. Gracias por hacer mi camino más ligero con su compañía, su humor y pláticas, por compartir trabajos en equipo y horas de estudio y por transformar esta experiencia en algo más que solo estudio.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
ÍNDICE DE CONTENIDO	IV
ÍNDICE DE TABLAS.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
RESUMEN	IX
ABSTRACT	X
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. General	3
2.2. Específicos	3
2.3. Hipótesis	3
3. JUSTIFICACIÓN.....	4
4. MARCO TEORICO.....	5
4.1. Importancia del agua en el crecimiento vegetal.....	5
4.2. Sustratos en la producción de plantas forestales	6
4.2.1. Peat moss	8
4.2.2. Perlita.....	9
4.2.3. Vermiculita	9
4.2.4. Fibra de coco	9
4.2.5. comparación entre peat moss y fibra de coco	9
4.3. Hidrogel como enmienda en sustratos	10
4.3.1. Hidrogel.....	10
4.3.2. Mecanismos de absorción y liberación de agua	11

4.3.3.	Tipos de hidrogeles utilizados en la agricultura	12
4.3.4.	Factores que influyen en su eficiencia	12
4.4.	Retención de humedad en sustratos con hidrogel	13
4.4.1.	Interacción hidrogel sustrato	13
4.4.2.	Estudios previos	13
4.4.3.	Efecto del hidrogel en la frecuencia de riego y ahorro de agua	14
4.5.	Intervalos de riego y eficiencia en viveros	15
4.5.1.	Intervalo de riego	15
4.5.2.	Problemas asociados al riego frecuente	16
4.5.3.	Ventajas de prolongar la humedad en sustratos	17
4.6.	Antecedentes del uso de hidrogel en viveros	17
4.6.1.	Casos de la aplicación en viveros forestales y hortícolas	17
4.6.2.	Resultados reportados sobre el crecimiento y supervivencia de las plantas	18
4.6.3.	Retos y limitaciones de su uso a gran escala	19
5.	MATERIALES Y MÉTODOS	20
5.1.	Descripción del área de estudio	20
5.1.1.	Localización	20
5.1.2.	Clima	21
5.1.3.	Precipitación	21
5.1.4.	Condiciones del sitio donde se realizó el experimento	21
5.2.	Materiales	21
5.2.1.	Sustrato	21
5.2.2.	Contenedores	22
5.2.3.	Pesado del hidrogel	22

5.3.	Tratamientos	22
5.3.1.	Descripción de tratamientos	22
5.4.	Diseño experimental	23
5.4.1.	Tipo de diseño	23
5.4.2.	Estructura experimental	23
5.4.3.	Manejo previo al experimento.....	24
5.4.4.	Periodo de evaluación.....	24
5.5.	Variables evaluadas	24
5.5.1.	Masa (g)	24
5.5.2.	Humedad relativa del sustrato (%).....	24
5.5.3.	Temperatura y humedad relativa del ambiente.....	25
5.6.	Análisis estadístico.....	25
6.	RESULTADOS.....	26
6.1.	Pérdida de humedad en los tratamientos (Tendencia general)	26
6.2.	Pérdida de humedad en el tiempo	26
6.3.	Validación de supuestos del modelo	28
6.4.	Análisis de varianza (ANOVA).....	29
6.4.1.	Día 10	29
6.4.2.	Día 18	29
6.5.	Medias marginales.....	30
6.6.	Comparaciones múltiples (Tukey HSD)	32
7.	DISCUSIÓN.....	34
8.	CONCLUSIÓN.....	37
9.	RECOMENDACIONES	38
	Bibliografía.....	39

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Descripción de tratamientos utilizados en el experimento.	22
Tabla 2. Resultados de la prueba de normalidad Shapiro-Wilk aplicada a los residuos.....	28
Tabla 3. Resultados de las pruebas de homogeneidad de varianzas (Levene y Bartlett) aplicadas a los residuos.....	29
Tabla 4. Resultados del ANOVA para el día 10.....	30
Tabla 5. Resultados del ANOVA para el día 18.....	30
Tabla 6. Grupos de Tukey día 10.....	32
Tabla 7. Grupos de Tukey día 18.....	33

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localización del área de estudio en el Laboratorio de Germoplasma del Departamento Forestal.....	20
Figura 2. Diseño experimental.....	23
Figura 3. Pérdida de humedad Día 10, fibra de coco (Azul) Peat moss (Naranja).....	27
Figura 4. Pérdida de humedad Día 18, fibra de coco (Azul) Peat moss (Naranja).....	28
Figura 5. Medias marginales estimadas (IC 95%) de la pérdida de humedad por tratamiento en el día 10.....	31
Figura 6. Medias marginales estimadas (IC 95%) de la pérdida de humedad por tratamiento en el día 18.....	31

RESUMEN

El presente estudio evaluó el efecto de tres proporciones de hidrogel (0.5 g, 0.75 g y 1 g) incorporadas en dos sustratos comúnmente utilizados en viveros forestales (peat moss y fibra de coco), con el fin de determinar su capacidad para prolongar la retención de humedad más allá de los intervalos convencionales de riego. El experimento se estableció bajo un diseño completamente al azar con 80 unidades experimentales, sometidas a un riego inicial por inmersión durante 24 horas y posteriormente evaluadas durante 18 días sin riegos adicionales. Se registró diariamente la masa de cada unidad y se calculó la pérdida de humedad relativa. Los análisis estadísticos incluyeron ANOVA, pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas, así como comparaciones múltiples mediante Tukey HSD. Los resultados mostraron diferencias claras entre sustratos y entre dosis de hidrogel. La fibra de coco presentó menores pérdidas de humedad y una deshidratación más lenta en comparación con el peat moss, evidenciando una mayor estabilidad hídrica. En peat moss, las dosis de hidrogel generaron diferencias significativas desde los primeros días, mientras que en fibra de coco la variación entre tratamientos fue menor al inicio y más notable hacia el día 18. El tratamiento testigo de peat moss alcanzó el 100% de pérdida de humedad hacia el día 10, mientras que en fibra de coco la mayoría de los tratamientos conservaron humedad hasta el día 18. Los resultados confirman que la retención de humedad depende de las propiedades físicas del sustrato y del tiempo transcurrido tras la hidratación inicial, así como de la dosis de hidrogel aplicada. Se concluye que el hidrogel prolonga la humedad disponible, aunque presenta un límite funcional según el tipo de sustrato. Los hallazgos aportan información útil para mejorar la eficiencia hídrica en viveros forestales y optimizar el manejo de riego y sustratos.

ABSTRACT

This study evaluated the effect of three hydrogel proportions (0.5 g, 0.75 g, and 1 g) incorporated into two commonly used nursery substrates (peat moss and coconut fiber) in order to determine their capacity to prolong moisture retention beyond conventional irrigation intervals. The experiment followed a completely randomized design with 80 experimental units, all subjected to an initial 24-hour immersion irrigation and subsequently monitored for 18 days without additional watering. Daily mass measurements were recorded to calculate relative moisture loss. Statistical analyses included ANOVA, normality and variance homogeneity tests, and Tukey HSD multiple comparisons. Results showed clear differences between substrates and hydrogel doses. Coconut fiber exhibited lower moisture loss and slower dehydration compared to peat moss, indicating greater water-holding stability. In peat moss, hydrogel proportions produced significant differences early in the experiment, while in coconut fiber the variation among treatments was initially small and became more evident by day 18. The peat moss control treatment reached 100% moisture loss around day 10, whereas most coconut fiber treatments maintained moisture until day 18. Findings confirm that moisture retention is influenced by the physical properties of the substrate, the time elapsed after initial hydration, and the amount of hydrogel applied. The hydrogel effectively prolonged moisture availability but showed a functional limit depending on the substrate type. This research provides valuable information to improve water-use efficiency in forest nurseries and to optimize irrigation and substrate management.

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso indispensable para la vida y uno de los factores más determinantes en la productividad agrícola y forestal. Sin embargo, en las últimas décadas, el crecimiento poblacional, la expansión agrícola y los efectos del cambio climático han intensificado la presión sobre este recurso, provocando una disminución alarmante de su disponibilidad en muchas regiones del mundo. Se estima que, de mantenerse las prácticas actuales, para el año 2030 el planeta enfrentará un déficit del 40% entre la demanda de agua y el suministro de agua disponible, recordando que en los últimos 100 años el consumo de agua se ha multiplicado por seis (Deminski, 2024). Este panorama plantea un reto crucial: desarrollar alternativas que favorezcan un uso eficiente y sostenible del recurso hídrico, especialmente en sectores como la agricultura y la producción forestal, donde el agua resulta esencial para el desarrollo de las plantas.

Entre las estrategias emergentes para mejorar la eficiencia hídrica destaca el uso de polímeros hidrofílicos o hidrogeles. Este término se ha empleado desde 1948 para describir geles coloidales de sales orgánicas (Kaur, 2024), actualmente se define como una red polimérica hidrófila, reticulada física o químicamente, con alta capacidad de retención de agua sin perder su estructura (Silva, 2024). Estas propiedades han impulsado su aplicación en la agricultura y la horticultura durante las últimas décadas, aprovechando su capacidad de hinchamiento y liberación controlada de agua para mejorar la disponibilidad hídrica en los sustratos (García-Moreno, 2024).

La importancia del hidrogel radica en su potencial para incrementar la eficiencia en el uso del agua, un desafío clave en la producción vegetal. Frente a la reducción de recursos hídricos y los altos costos de tecnologías de riego más complejas, el hidrogel se presenta como una alternativa económica y funcional, capaz de mejorar la retención de humedad en el sustrato, favorecer la absorción de nutrientes y reducir la frecuencia de riego (Deminski, 2024).

No obstante, la mayoría de los estudios se han centrado en cultivos agrícolas y hortícolas, mientras que el uso de hidrogel en viveros forestales ha sido poco explorado. Esta carencia de información limita su aprovechamiento en un sector que, al igual que la agricultura, enfrenta los desafíos de la escasez de agua. En los viveros forestales, la disponibilidad de

agua en el medio de cultivo es un factor determinante para el desarrollo de las plántulas, aunque gran parte del agua aplicada durante el riego se pierde por evaporación o lixiviación (Iván Quiroz Marchant, 2009).

En este contexto la presente investigación busca contribuir a la administración eficiente del recurso hídrico en viveros forestales mediante la incorporación de hidrogel en los sustratos. Para ello, se evaluó el uso de polímeros absorbentes de agua en tres diferentes proporciones, aplicados en dos de los sustratos orgánicos más comúnmente utilizados en viveros forestales. Se espera que los resultados generen evidencia científica que respalde la aplicación de esta tecnología en la producción de plantas bajo contenedor, promoviendo un manejo más racional del agua y el desarrollo de prácticas productivas sostenibles frente a los retos ambientales actuales.

2. OBJETIVOS

2.1. General

Evaluar el efecto de 3 proporciones de hidrogel agregados a peat moss y fibra de coco con el fin de determinar su capacidad para prolongar la humedad más allá de los intervalos de riego convencionales.

2.2. Específicos

- Medir la disminución de la humedad en los sustratos orgánicos Peat moss y Fibra de coco en tres proporciones de hidrogel.
- Determinar el tiempo que cada sustrato tarda en perder la humedad suficiente para requerir riego adicional.
- Evaluar que tan efectivos son los dos sustratos cuando se mezclan con diferentes proporciones de hidrogel.
- Examinar si los resultados obtenidos coinciden con los efectos que se anticipan al añadir hidrogel para mejorar la capacidad de retención de agua.

2.3. Hipótesis

- Ho: No existen diferencias significativas en la pérdida de humedad entre las proporciones de hidrogel ni entre los sustratos (Peat moss y Fibra de coco).
- Ha: Existen diferencias significativas en la pérdida de humedad entre las proporciones de hidrogel y entre los sustratos (Peat moss y Fibra de coco).

3. JUSTIFICACIÓN

Desde una perspectiva integral, esta investigación planea aportar recomendaciones para la selección de dosis de hidrogel y el manejo de sustratos, con el fin de optimizar la eficiencia hídrica y operativa en viveros forestales. Los resultados beneficiarán directamente a técnicos, productores y responsables de viveros públicos, privados y comunitarios, al tiempo que generarán información cuantitativa y una base metodológica replicable sobre la dinámica de humedad en condiciones controladas. Asimismo, los hallazgos permitirán mejorar la eficiencia hídrica, disminuir la frecuencia de riegos y reducir costos operativos dentro de los procesos de producción de planta, lo que resulta relevante en regiones semiáridas o con disponibilidad hídrica limitada.

4. MARCO TEORICO

4.1. Importancia del agua en el crecimiento vegetal.

El agua constituye uno de los factores más determinantes en el crecimiento y desarrollo de las plantas, ya que participa directamente en procesos fisiológicos esenciales como la fotosíntesis, la transpiración la absorción de nutrientes y el transporte de solutos. Su disponibilidad condiciona la productividad, la supervivencia y la distribución de las especies vegetales, tanto en ecosistemas naturales como en sistemas de producción controlada.

La producción de biomasa en una comunidad vegetal está estrechamente relacionada con la cantidad de agua disponible. Se estima que para producir un gramo de biomasa se requieren entre 100 y 1000 gramos de agua, aunque este valor depende del tipo de planta y de las condiciones ambientales (Medrano, 2007). En este sentido, la productividad de una especie está más influenciada por la disponibilidad hídrica que por cualquier otro factor ambiental.

La deficiencia de agua induce en las plantas una serie de respuestas morfológicas, fisiológicas y metabólicas que buscan reducir la pérdida de agua y mantener la homeostasis celular. Entre los cambios más comunes se encuentran la disminución en la síntesis de proteínas y la velocidad de crecimiento, alteraciones en la transpiración, respiración y fotosíntesis, así como modificaciones en la distribución de nutrientes. Una de las respuestas mejor caracterizadas frente al déficit hídrico es el cierre parcial o total de las estomas, mecanismo regulado principalmente por la fitohormona ácido abscísico (ABA), que contribuye a evitar la deshidratación (Robles, 2007).

El estrés hídrico puede presentarse tanto por una disminución como por exceso en la disponibilidad de agua. La respuesta de la planta ante estas condiciones se inicia cuando se detecta un desajuste a nivel celular, lo que activa rutas bioquímicas de transducción de señales que coordinan las repuestas a nivel de todo el organismo vegetal. A nivel celular, las principales reacciones frente al estrés hídrico incluyen el ajuste osmótico mediante la acumulación de metabolitos compatibles, la inactivación de especies reactivas de oxígeno, el

ajuste en el balance carbono/nitrógeno, la oxidación del exceso de poder reductor (NADPH y otros compuestos reducidos), y el almacenamiento alternativo de carbono o nitrógeno (Kovalsky París, 2004).

La capacidad de una planta para superar estas condiciones depende de su resistencia intrínseca. Según Prieto Ruíz (2012), para incrementar la supervivencia inicial de las plantas en campo, es fundamental que las plántulas hayan sido sometidas a un proceso de preacondicionamiento. Este consiste en modificar las prácticas de cultivo en vivero -como reducir la cantidad de agua suministrada, disminuir las dosis de nitrógeno, aumentar las de potasio y eliminar el efecto invernadero- con el propósito de inducir un estrés controlado. Dicho proceso provoca una reducción en el crecimiento en altura, promueve la formación de la yema apical e induce mecanismos de resistencia ante temperaturas extremas (Ruíz, 2004).

El uso racional del agua en la producción de planta representa un aspecto prioritario, que puede optimizarse mediante la implementación de prácticas orientadas a ajustar el consumo hídrico a los requerimientos fisiológicos del cultivo. Entre estas estrategias se incluyen el adecuado manejo y acondicionamiento del sustrato, la instalación de sistemas de riego eficientes, la aplicación de prácticas culturales apropiadas, la caracterización fisicoquímica de los sustratos y el aprovechamiento de lixiviados mediante sistemas de recuperación (Cabot, 2022). Estas acciones contribuyen a mejorar la eficiencia en el uso del recurso hídrico y a promover la sostenibilidad de los sistemas de producción vegetal.

4.2. Sustratos en la producción de plantas forestales

Las especies forestales han sido divididas en dos diferentes tipos de producción: plántulas a raíz desnuda y plántulas en contenedor. La producción en contenedor se cultiva en un sustrato artificial, bajo condiciones ambientales controladas. Dado que el volumen del sustrato es relativamente pequeño, las raíces se aglutinan en el sustrato facilitando su manejo y traslado en la producción (Thomas D. Landis, 1995).

Un sustrato es el material que sirve como base y soporte para el crecimiento de las plantas y, en ocasiones, también aporta parte de los nutrientes esenciales. Para seleccionar el sustrato

más conveniente en la producción de plantas, es necesario analizar varios aspectos relacionados con su comportamiento, como su capacidad para retener humedad, el grado de porosidad, el peso del material, la circulación del aire dentro de él, así como el nivel de acidez o de alcalinidad y la disponibilidad de minerales útiles para el desarrollo vegetal. Además, es fundamental considerar factores externos, entre ellos la especie que se pretende cultivar, la temporada del año, el costo del material, su acceso en el mercado y el propósito final del cultivo (Varela, 2013).

Entre las propiedades físicas más importantes se encuentra la capacidad de retención de agua y la aireación. La primera se refiere al porcentaje del espacio poroso que permanece ocupado por agua después del drenaje; un buen sustrato debe retener suficiente humedad para el crecimiento de las plántulas, pero permitir el drenaje del exceso mediante los macroporos, evitando el encharcamiento. La aireación, por su parte, depende de estos macroporos, que facilitan la difusión de oxígeno y la eliminación de dióxido de carbono generado por la respiración radicular (Kobs, 2024).

Otra característica importante es la porosidad total, que depende de la proporción entre espacios pequeños y grandes dentro del material. Esta propiedad se considera adecuada cuando el sustrato está formado por elementos con diámetros aproximados de 0.8 a 6 mm, ya que ello permite que el sistema radicular disponga tanto de humedad suficiente como buena circulación de aire. La densidad aparente también juega un papel clave, pues está relacionada con el peso y el grado de compactación del sustrato, lo cual puede influir en la penetración de las raíces y en el desplazamiento del agua y del aire a través del medio (Dumroese R. K., 2009).

Desde la perspectiva química, ofrecer una nutrición adecuada es esencial para asegurar un desarrollo óptimo de las plantas jóvenes. Al inicio, las plántulas utilizan las reservas internas contenidas en la semilla, pero conforme crecen, pasan a depender del sustrato para obtener los nutrientes necesarios. La condición química del sustrato también es importante, ya que determina que tan accesibles resultan los nutrientes para la planta. Muchas especies se desarrollan mejor dentro de un rango cercano a 5.5-6.5. Asimismo, la capacidad del sustrato para atraer y mantener iones con carga positiva -propiedad conocida como CIC- ayuda a conservar y suministrar los nutrientes indispensables para el crecimiento (Brady, 2017).

En cuanto a las propiedades biológicas, los sustratos artificiales suelen ser los más recomendables en la producción de planta, ya que están libres de patógenos y semillas de malezas. No obstante, los sustratos naturales también pueden emplearse, siempre que se sometan a procesos de pasteurización o esterilización que aseguren su inocuidad (Dumroese R. K., 2009).

4.2.1. Peat moss

El *peat moss* se encuentra de manera abundante en regiones del hemisferio norte, sobre todo en regiones con tundra húmeda. Las poblaciones ubicadas más al norte aparecen en el archipiélago de Svalbard. Sin embargo, también hay extensas áreas donde este musgo crece en el hemisferio sur, destacando regiones como Nueva Zelanda, Finlandia, Tasmania Y las zonas australes de Chile y Argentina (Hernández Estrada, 2011).

La acumulación de turba se produce exclusivamente en turberas, que son áreas con o sin vegetación donde ocurre una descomposición incompleta de la materia orgánica debido al exceso de agua y la falta de oxígeno. Este proceso genera la formación natural de una capa de turba de 30 cm o más en la superficie (Altmann, 2008).

Durante varias décadas, la turba ha sido el medio de cultivo más importante, ya que sus características la hacen ideal para este propósito. Su estructura celular, de no descompuesta a moderadamente descompuesta, garantiza una alta capacidad de retención de agua y una adecuada aireación. Su bajo pH y contenido de nutrientes permiten una fácil adaptación a diferentes cultivos, y debido a su modo de formación, está libre de plagas y patógenos (Reinikainen, 2012).

Una de las principales limitaciones de su uso es que, aunque existen grandes extensiones de turberas en el mundo, su regeneración es extremadamente lenta. Por ello, desde hace más de dos décadas se han realizado numerosos estudios en universidades, institutos y empresas para encontrar sustitutos más sostenibles (Reinikainen, 2012).

4.2.2. Perlita

La perlita es un silicato de origen volcánico que se obtiene mediante un proceso industrial que incluye un tratamiento térmico de aproximadamente 1200°C. se caracteriza por mantener un pH estable y por su baja capacidad de retención de agua. Generalmente se emplea en combinación con materiales orgánicos para proporcionar soltura, permeabilidad y mejorar la aireación del sustrato (Ballester, 1999).

4.2.3. Vermiculita

La vermiculita es un material inorgánico natural, compuesto por silicatos hidratados de magnesio, aluminio y hierro. Posee una estructura laminar típica, aunque disgregada debido a la rápida evaporación del agua de constitución por calentamiento a aproximadamente 1000°C. Se comercializa en distintas granulometrías, que varían entre 0.75 y 8 mm de diámetro, y se caracteriza por su alta capacidad de conservar de agua (Ballester, 1999).

4.2.4. Fibra de coco

La fibra de coco se obtiene de mesocarpio del fruto de la palma cocotera (*Cocos nucifera*). Este material presenta una alta capacidad de aireación, buena rehumectabilidad y una retención moderada de agua, propiedades que la hacen comparable con el *peat moss* (Reinikainen, 2012).

Diversos estudios han señalado que la fibra de coco puede actuar como sustituto parcial o total de la turba; sin embargo, sus propiedades físicas dependen en gran medida del tamaño y la distribución de las partículas. Por ello cuando se utiliza en viveros, es necesario ajustar los programas de riego y manejo del sustrato en función del cultivo (Abad, 2005).

4.2.5. comparación entre peat moss y fibra de coco

tanto el peat moss como la fibra de coco destacan por su capacidad de almacenar agua, aunque presentan diferencias notables en su estructura y comportamiento físico. El peat moss posee una estructura celular porosa y parcialmente descompuesta, lo que permite retener

grandes volúmenes de agua capilar, manteniendo una humedad estable durante periodos prolongados. Su composición le confiere una gran capacidad para retener humedad y una liberación gradual de agua hacia las raíces (Hernández Escobar, 2009).

Por otro lado, la fibra de coco, aunque también presenta una buena retención de agua, muestra una mayor aireación interna y un drenaje más rápido, lo que favorece la oxigenación del sistema radicular, especialmente en condiciones de riego frecuente. Sin embargo, su capacidad de retención hídrica puede variar significativamente dependiendo del tamaño de partícula y del grado de procesamiento del material (Reyes Muñoz, 2024).

En términos generales, el peat moss ofrece una retención de humedad superior, mientras que la fibra de coco proporciona un mejor equilibrio entre aireación y drenaje. Por ello, en muchos sistemas de producción optan por mezclar ambos materiales, con el fin de aprovechar las ventajas combinadas de retención y oxigenación en el desarrollo de las plantas forestales (Arévalo, 2016).

4.3. Hidrogel como enmienda en sustratos

Las investigaciones sobre el uso de Hidrogel como enmienda en sustratos agrícolas y forestales han aumentado en los últimos años, debido a su potencial para mejorar la retención de agua y la disponibilidad hídrica para las plantas (Zhu, 2024).

Estos polímeros permiten reducir la frecuencia de riego, conservar la humedad en el entorno radicular y favorecer el establecimiento de las plántulas, especialmente en condiciones de estrés hídrico o suelos con baja capacidad de retención de agua (Takahashi, 2025).

4.3.1. Hidrogel

Los hidrogeles son materiales hidrofílicos, insolubles en agua, blandos y elásticos, que en presencia de agua se hinchan considerablemente, aumentando su volumen sin perder su forma hasta alcanzar un equilibrio fisicoquímico. En estado deshidratado son cristalinos y duros. El carácter hidrófilo se debe a la presencia de grupos polares afines con el agua, como: -OH, COOH, -CONH-, -CONH₂-, Y -SO₃H (Sánchez, 1995). La insolubilidad en agua se

debe a la existencia de una red polimérica tridimensional en su estructura molecular. Este entrecruzamiento puede originarse por fuerzas cohesivas débiles, enlaces covalentes o iónicos (Zuluaga Corrales, 2006).

Los hidrogeles se pueden clasificar según su estructura química y los componentes utilizados. En la agricultura, los hidrogeles copolímeros son los más empleados debido a su alta capacidad de retención de agua, estabilidad, compatibilidad con sustratos y bajo costo. (Amashta, 2005).

4.3.2. Mecanismos de absorción y liberación de agua

Durante el proceso de absorción las moléculas de agua penetran en la red del polímero gracias a los grupos funcionales hidrofílicos (-COOH, -OH, -CONH₂, -SO₃H), que establecen enlaces de hidrogeno con el disolvente. Esta interacción provoca el hinchamiento del material, cuya magnitud depende del grado de entrecruzamiento de la red polimérica. Cuando las condiciones del entorno cambian y la humedad disminuye, se inicia el proceso de liberación de agua, que ocurre por difusión desde el interior del hidrogel hasta el medio circundante. este fenómeno se mantiene hasta alcanzar un equilibrio entre la presión osmótica del agua retenida y la fuerza elástica de contracción del polímero (Salceda, 2018).

El estado de hinchamiento es el resultado del balance entre las fuerzas cohesivas y dispersivas intermoleculares que actúan en las cadenas hidratadas. Las fuerzas cohesivas son principalmente debidas a entrecruzamientos covalentes, dando lugar a la formación de hidrogeles químicos. Las fuerzas dispersivas se atribuyen, en parte, a una repulsión entre los iones fijos de la red, provocándole hinchamiento del material (HERNANDEZ, 2007).

La absorción de agua en el poliacrilato de sodio ocurre mediante un proceso osmótico, al entrar en contacto con el agua los iones del polímero se separan y permiten que el agua penetre su red interna, provocando que el material aumente su volumen y forme un gel estable. Esta expansión ocurre porque las cargas presentes en la cadena retienen el agua en su interior. A su vez, el polímero puede liberar parte de esta humedad cuando se altera el equilibrio osmótico (Evangelista, 2019).

4.3.3. Tipos de hidrogeles utilizados en la agricultura

Hasta la fecha, se han encontrado tres tipos principales de hidrogeles apropiados para uso agrícola, entre ellos: Copolímeros de injerto de almidón, Poliácridatos y poliacrilamidas reticulados y copolímeros de acrilamida-acrilato (T.M. Neethu, 2018).

El poliácridato de sodio es un polímero constituido por unidades repetidas de acrilato, cuya estructura incorpora grupos carboxilato capaces de interactuar eficientemente con las moléculas de agua. Esta capacidad le permite absorber y retener volúmenes hídricos muy superiores a su propio peso, alcanzando capacidades de hidratación del orden de cientos de veces su masa inicial. El proceso de absorción ocurre mediante la entrada progresiva de agua en la red polimérica, lo que induce la expansión del material. Sin embargo, dicha hidratación no es inmediata pues requiere un intervalo de tiempo en el cual el polímero completa su hinchamiento y alcanza su equilibrio interno (Evangelista, 2019).

4.3.4. Factores que influyen en su eficiencia

La eficiencia de los hidrogeles depende de sus propiedades mecánicas, tamaño de partícula y concentración en la mezcla del sustrato. Si las partículas del hidrogel son pequeñas y blandas, penetran con mayor facilidad en el suelo, lo que reduce el drenaje y mejora la disponibilidad de agua para las raíces. En la práctica, se emplea alrededor del 0.1% en peso de hidrogel en este tipo de aplicaciones (Amashta, 2005).

La presencia de sales disueltas en el agua o en el sustrato también reduce la capacidad de absorción del hidrogel, debido a que los iones neutralizan las cargas del polímero (Amashta, 2005). Además, los cambios de temperatura modifican las interacciones polímero-polímero y polímero-solución, provocando variaciones en el grado de hinchamiento (J.L. Escobar, 2002).

Según diversos estudios, se ha confirmado que el hidrogel es sensible a la acción de los rayos UV y se degrada en oligómeros. El poliácridato se vuelve mucho más sensible a la degradación microbiológica aeróbica y anaeróbica, y puede degradarse a un ritmo del 10 al 15% anual en compuestos de agua, dióxido de carbono y nitrógeno (T.M. Neethu, 2018).

4.4. Retención de humedad en sustratos con hidrogel

4.4.1. Interacción hidrogel sustrato

El hidrogel, al incorporarse al sustrato, modifica sus propiedades físicas, principalmente al mejorar la aireación y la capacidad de retención de agua. Durante los ciclos de hidratación y deshidratación, los cristales del polímero se expanden y contraen, lo que favorece la separación de las partículas del suelo y reduce la compactación, mejorando así la estructura del sustrato y la disponibilidad de oxígeno para las raíces (HERNANDEZ, 2007).

Sin embargo, la eficacia del hidrogel depende de diversos factores como el pH del suelo, la salinidad y la presencia de iones. Su uso no es recomendable en suelos con pH inferior a 4 o superior a 9, ya que bajo estas condiciones el polímero se degrada con mayor rapidez, especialmente en aguas con altas concentraciones de calcio y magnesio (HERNANDEZ, 2007). Además, los polímeros no reducen directamente la cantidad de agua utilizada por las plantas, pues esta depende de variables como la textura del suelo, el tipo de hidrogel empleado y la composición iónica del medio (Fry, 1981).

Por otra parte, Wang (1990) señala que los hidrogeles no pueden extraer agua eficazmente de un sustrato insaturado. En sus ensayos, se observó que incluso tras ocho horas en agua destilada, el hidrogel no alcanzó su máxima hidratación, y que su expansión completa en un medio de cultivo tomó un periodo significativamente mayor.

Asimismo, el hidrogel actúa como agente que solubiliza y retiene fertilizantes por más tiempo en el suelo, evitando su lixiviación y favoreciendo su aprovechamiento por las plantas (HERNANDEZ, 2007).

4.4.2. Estudios previos

Diversas investigaciones respaldan la efectividad del hidrogel en la mejora de las propiedades hídricas del sustrato y el desarrollo vegetal. En el estudio realizado por Reyna (2011) sobre la producción de *Pinus greggii* Engelm. En mezclas de sustrato con hidrogel y riego en vivero, se encontró que la combinación de 20% de corteza, 80% de aserrín y gL-1 de hidrogel promovió una mejor calidad de planta y mayor supervivencia en campo

De igual manera, Akhter (2004) en su investigación “Effects of hydrogel amendment on water storage of sandy loam and loam soils and seedling growth of barley, wheat and chickpea” demostró que la adición de hidrogel incrementa la retención de agua del suelo y reduce la evaporación, generando menores requerimientos de riego y un mejor crecimiento inicial en algunas especies. No obstante, su eficiencia varía según el tipo de suelo y la especie cultivada.

Hernández (2007) también destacó que el uso de hidrogel puede revertir la alta mortalidad en reforestaciones, donde normalmente el 80% de los árboles plantados no sobreviven; con la aplicación del polímero, las pérdidas se reducen hasta un 20%.

El artículo de Kuneski, A. C. (2025), señala que el desempeño del hidrogel depende de la textura del suelo y de la cantidad aplicada, ya que el gel no siempre puede expandirse completamente dentro de la matriz del suelo. En suelos arcillosos, la estructura compacta restringe su hinchamiento y reduce su eficiencia, mientras que en suelos más sueltos el beneficio es mayor, aunque solo hasta cierto punto. Esto demuestra que la capacidad del hidrogel para almacenar agua tiene un límite funcional, más allá del cual no se incrementa la disponibilidad hídrica y pueden presentarse efectos negativos en la estructura del suelo.

La incorporación de hidrogel mantiene una alta estabilidad en las propiedades físicas del sustrato, ya que aun cuando se incrementa la dosis del polímero, las variaciones obtenidas no generan diferencias marcadas entre tratamientos de un mismo sustrato. Tanto la capacidad de retención de agua como la porosidad de aireación se modifican de forma leve y sin cambios significativos entre dosis. Esto sugiere que el hidrogel actúa de manera consistente dentro del sustrato, sin provocar alteraciones abruptas en su estructura ni en el desempeño físico (Barbaro, 2015).

4.4.3. Efecto del hidrogel en la frecuencia de riego y ahorro de agua

El uso de hidrogeles en sustrato contribuye de manera significativa a reducir la frecuencia de riego y el consumo total de agua. T.M. Neethu (2018) reportó que la capacidad de retención hídrica del suelo puede incrementarse entre un 50% y 70% con una enmienda adecuada y diferentes proporciones suelo-hidrogel.

De manera similar, K.C. Taylor (1986) en "The Effect of Hydrophilic Polymer on Media Water Retention and Nutrient Availability to *Ligustrum Lucidum*" observó que la incorporación del polímero hidrofílico redujo la cantidad de agua requerida a casi la mitad respecto al tratamiento control.

Actualmente, los hidrogeles se aplican ampliamente en agricultura, silvicultura, paisajismo, horticultura y floricultura. Cuando se emplean de manera adecuada, permiten reducir los requerimientos de riego entre un 40% y 60%, al generar una reserva de agua disponible para el cultivo (HERNANDEZ, 2007).

4.5. Intervalos de riego y eficiencia en viveros

Actualmente, se estima que cerca del 80% del agua disponible en el país se destina a actividades de riego agrícola; sin embargo, su aprovechamiento es poco eficiente, ya que solo alrededor de la mitad se utiliza realmente, mientras que el resto se pierde por infiltración hacia los mantos freáticos o por evaporación (HERNANDEZ, 2007).

4.5.1. Intervalo de riego

el intervalo de riego es el número de días que transcurren entre dos aplicaciones de agua consecutivas. Este intervalo se ajusta dependiendo de los objetivos del cultivo, y las decisiones de manejo. Además, sirve como indicador útil para estimar el consumo de agua. Su duración puede verse influenciada por diversos factores, como la región geográfica, el tipo de control o sistema de riego, las condiciones climáticas y la cantidad de precipitación recibida (Maheshwari, 2016).

En el artículo "Germinación De Las Semillas De *Pinus Ocarpa* Schiede Utilizando Riego Con Agua Residual Sedimentada" de Rivera (2012) se menciona que en la etapa de germinación el riego se aplica cada 2 días, en el caso de ser verano.

López (2010), en el manual Producción de mudas de especies forestales, señala que es mejor vigilar las plantas y regar cuando lo necesitan y no se recomienda un calendario estricto. Es

importante que el riego no se deba aplicar en las horas de mayor incidencia de calor, porque estas aumentan considerablemente la evapotranspiración y provocan lesiones en las plantas.

Tanto el déficit como el exceso de agua afectan la productividad agrícola. El déficit hídrico puede reducir el rendimiento, mientras que el exceso puede causar encharcamientos y estrés por falta de oxígeno, afectando negativamente la salud de las plantas (Steduto, 2012).

En los resultados del estudio de F. Yazdani (2007) se muestra que la incorporación de polímeros hidrofílicos al sustrato mejoró significativamente el rendimiento de las semillas, la biomasa total, el índice de área foliar, de manera específica, las plantas tratadas con hidrogel tuvieron un alto rendimiento y desarrollo con intervalos de riego de hasta 8 días, lo que indica que el hidrogel puede ampliar el intervalo de riego necesario, mitigando los efectos del déficit hídrico y optimizando el uso del agua en el cultivo.

4.5.2. Problemas asociados al riego frecuente

el exceso de riego en la producción de plantas en contenedor puede ocasionar diversos problemas fisiológicos y sanitarios. Es una de las principales causas de enfermedades radiculares, ya que el exceso de humedad favorece el desarrollo de patógenos y limita la oxigenación del sistema radical. Asimismo, el riego excesivo provoca la lixiviación de fertilizantes, lo que genera pérdidas de nutrientes esenciales y reduce la eficiencia en la fertilización, afectando el crecimiento y la calidad de las plantas (Dumroese R. K., 2012).

El riego excesivo o el encharcamiento del sustrato ocasiona condiciones de hipoxia o anoxia en la zona radical, lo que limita la respiración de las raíces y genera la acumulación de compuestos tóxicos como etanol, acetaldehído y etileno. Estos procesos inducen alteraciones fisiológicas como el cierre estomático, la reducción de la fotosíntesis y la senescencia foliar prematura. Además, el exceso de agua afecta la absorción de nutrientes al modificar el pH y el potencial redox del sustrato, provocando deficiencias o acumulaciones tóxicas de elementos como magnesio y hierro (Pardos, 2004).

4.5.3. Ventajas de prolongar la humedad en sustratos

Prolongar la humedad en los sustratos aporta múltiples beneficios fisiológicos y agronómicos. Según Ali et al. (2024), el uso de hidrogeles permite mantener la humedad disponible por más tiempo, reduciendo la frecuencia de riego y las pérdidas por evaporación o lixiviación. Esta humedad extendida favorece la germinación y el desarrollo radicular, mejora el transporte y disponibilidad de nutrientes, disminuye el estrés por sequía y aumenta la supervivencia de plantas bajo condiciones adversas.

De igual manera, en el estudio de Nandi y Brave (2011), *Environmentally friendly superabsorbent polymers for water conservation in agricultural lands*, evidencio que la mayor humedad retenida en el sustrato incrementa el crecimiento vegetal incluso en escenarios de riego limitado.

4.6. Antecedentes del uso de hidrogel en viveros

Muhammad (2024) señala que, aunque los SAP fueron desarrollados inicialmente por el USDA en la década de 1960, su eficacia ha sido demostrada en estudios posteriores. La revisión incluye que los polímeros super absorbentes mejoran significativamente la retención de agua, reducen las perdidas por evaporación y percolación, y aumentan el crecimiento y rendimiento de cultivos en suelos áridos.

4.6.1. Casos de la aplicación en viveros forestales y hortícolas

El hidrogel se utiliza como una enmienda en los sustratos con el propósito de incrementar la retención de agua y disminuir el estrés hídrico en las plantas. Además, se ha comprobado que estos polímeros son capaces de retener iones nutritivos y reducir su pérdida por lixiviación, lo que resulta especialmente beneficioso en sustratos con baja capacidad de intercambio catiónico (Landis, 2012).

Por su parte Wanjiru (2018) realizó un estudio comparativo sobre el crecimiento de plántulas en vivero con y sin la incorporación de hidrogel, encontrando que aquellas cultivadas en

sustratos con hidrogel mostraron mayores valores promedio de crecimiento. Igualmente, observaron una mejora en la eficiencia del uso del agua.

De manera similar, Leciejewski (2009) evidencio que la aplicación de hidrogel incremento de forma significativa la capacidad de retención de agua en suelos arenosos, demostrando su eficiencia como enmienda para mejorar las propiedades físicas del suelo.

Según lo reportado por Koupai (2008), la incorporación de hidrogel en el sustrato mejora de manera proporcional la retención de humedad: a medida que aumenta la cantidad de polímero añadida, también se incrementan los días que el sustrato puede permanecer sin riego antes de alcanzar el punto de marchitamiento. En su estudio, las dosis más altas (hasta 6 gramos de hidrogel por 1 Kg de sustrato) mostraron una conservación de agua considerablemente mayor que en las concentraciones bajas y que el control sin tratamiento, especialmente en sustratos arenosos. Asimismo, estas aplicaciones incrementaron la cantidad de agua disponible y redujeron la frecuencia de riego requerida sin efectos negativos sobre el crecimiento.

4.6.2. Resultados reportados sobre el crecimiento y supervivencia de las plantas

El crecimiento y estado nutricional de las plántulas de *cedrela odorata* mejoraron con el uso de envases de 500 mL la adición de 4 g de hidrogel por litro de sustrato, debido a que estas condiciones favorecieron la formación de biomasa radical y, con ello, la absorción de agua y nutrientes (Basave Villalobos, 2016).

Ríos Anaya (2019) indico que las plántulas de *Cariniana pyriformis* crecen más en altura y grosor del tallo cuando se mantienen con una suficiente disponibilidad de agua (60 y 100% de la capacidad de campo).

La aplicación de hidrogel al medio de cultivo mejora los procesos de germinación y establecimiento de plántulas de *N. flexuosa*, pero se debe tener en consideración como el tipo de hidrogel, el tamaño de partícula y las características físicas y químicas del suelo (Visaguirre, 2024).

4.6.3. Retos y limitaciones de su uso a gran escala

Se debe tomar en cuenta la calidad del material, ya que aquellos mayores a 1mm de tamaño de partícula aumentan el tiempo de hidratación y maximizan los efectos de los cationes del suelo y la presión del suelo sobre la capacidad y absorción del agua. Además, se debe tomar en cuenta que el hidrogel rehidratado empuje la planta fuera del contenedor, evitar la formación de bolsas de aire al deshidratarse y asegurarse que el hidrogel capture eficazmente el agua durante los riegos (Crous, 2017).

El hidrogel puede representar una limitación al mezclarse en un sustrato con drenaje deficiente, por lo que se recomienda el uso de envases de mayor volumen para producir plántulas vigorosas (Basave Villalobos, 2016).

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Descripción del área de estudio.

5.1.1. Localización

El estudio se desarrolló en el Laboratorio de Germoplasma del Departamento Forestal de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, ubicado en Buenavista, Saltillo, Coahuila. El sitio se localiza en las coordenadas 25°21'9.27" Latitud Norte y 101° 1'37.51" Longitud Oeste; a una altitud de 1787 m.s.n.m. (Figura 1).

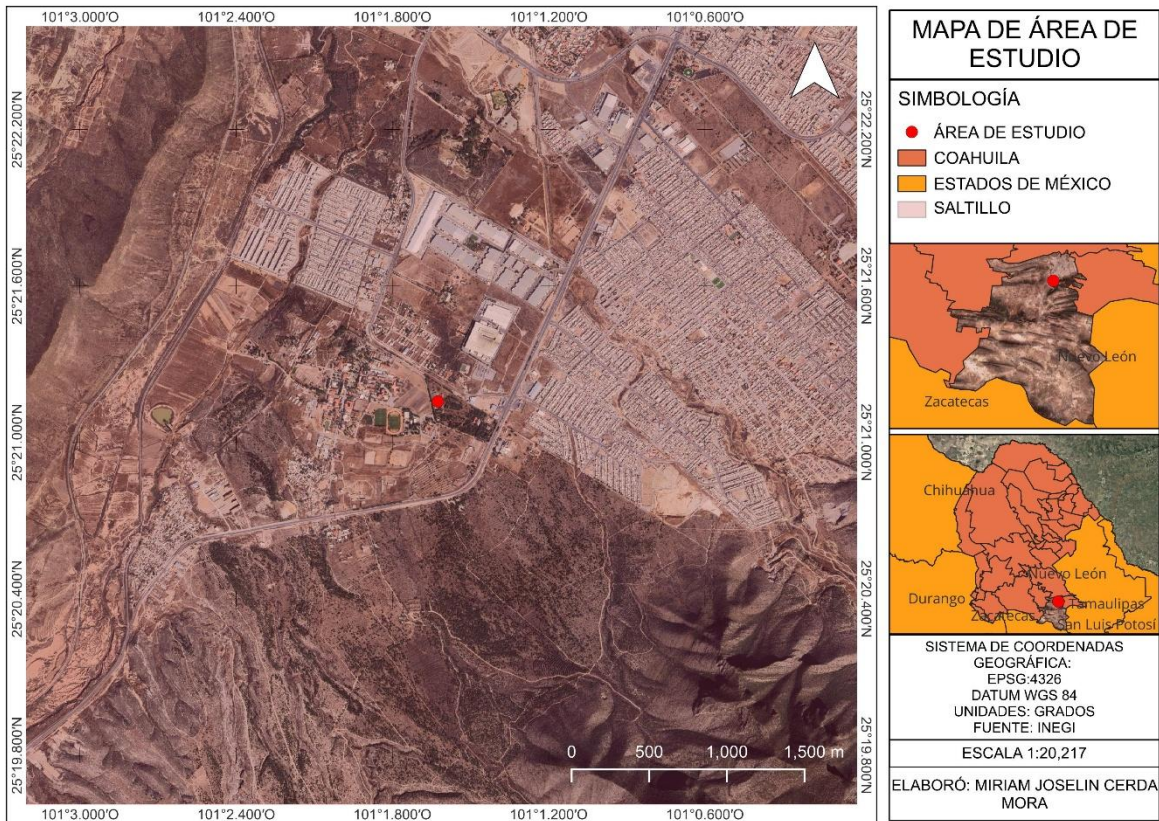


Figura 1. Mapa de localización del área de estudio en el Laboratorio de Germoplasma del Departamento Forestal.

5.1.2. Clima

La región presenta un clima templado subhúmedo con lluvias escasas la mayor parte del año, con variantes como semifrío, semiseco templado, seco semicálido, seco templado y muy seco semicálido. La temperatura media anual es de 17.5 °C, con mínimos en enero (5 °C) y diciembre (6 °C) y máximos en junio y julio (28 °C). Este comportamiento refleja inviernos fríos y veranos cálidos característicos de zonas semiáridas del noreste de México (INEGI, 2002).

5.1.3. Precipitación

La precipitación media anual es de 406.2 mm, la distribución mensual es irregular. Los valores mínimos en marzo (9.0 mm) y máximos en agosto (71.2 mm). El periodo de mayor precipitación se concentra entre junio y septiembre, mientras que los meses de invierno y principios de primavera presentan lluvias escasas, característica típica de climas semiáridos (INEGI, 2002).

5.1.4. Condiciones del sitio donde se realizó el experimento

El experimento se llevó a cabo en el Laboratorio de Germoplasma del Departamento Forestal, espacio que presenta condiciones ambientales relativamente estables, con menor variación de temperatura e iluminación a lo largo del día. Estas características favorecieron la uniformidad durante el periodo experimental.

5.2. Materiales

5.2.1. Sustrato

Se utilizó una unidad de peat moss (107 L), una unidad de vermiculita (144 L) y una de perlita (144 L). El peat moss fue previamente cribado y posteriormente se incorporó la vermiculita y la perlita hasta obtener una mezcla homogénea. La fibra de coco se utilizó en su presentación original, sin modificaciones.

5.2.2. Contenedores

Se emplearon tubetes tipo SUPERCELL de 125 ml, organizados en charolas con capacidad para 49 unidades cada una. Para el establecimiento del experimento se dispusieron tres charolas sobre una superficie fija, conformando un total de 80 unidades experimentales.

5.2.3. Pesado del hidrogel

El hidrogel de poliacrilato de sodio se pesó en cantidades de 0.5 g, 0.75 g y 1 g utilizando una báscula granataria calibrada. Cada dosis se incorporó de manera homogénea de 125 ml del sustrato correspondiente.

5.3. Tratamientos

5.3.1. Descripción de tratamientos

Tabla 1. Descripción de tratamientos utilizados en el experimento.

Tratamientos	Descripción
T1	0.5 g de hidrogel incorporado al sustrato de peat moss
T2	0.75 g de hidrogel incorporado al sustrato de peat moss
T3	1 g de hidrogel incorporado al sustrato de peat moss
T4	0.5 g de hidrogel incorporado al sustrato de fibra de coco
T5	0.75 g de hidrogel incorporado al sustrato de fibra de coco
T6	1 gramo de hidrogel incorporado al sustrato de fibra de coco
T7 Testigo	Sustrato de peat moss
T8 Testigo	sustrato de fibra de coco

5.4. Diseño experimental

5.4.1. Tipo de diseño

El experimento se estableció bajo un diseño completamente al azar (DCA). La unidad experimental consistió en un tubete Supercell con 125 mL de sustrato.

5.4.2. Estructura experimental

La estructura del diseño experimental se conformó de la siguiente manera: se evaluaron dos sustratos (peat moss y fibra de coco) combinados con tres dosis de hidrogel (0.5 g, 0.75 g y 1 g), además de dos tratamientos testigo sin incorporación de hidrogel. En total se generaron 8 tratamientos, cada uno con diez repeticiones, lo que resultó en 80 unidades experimentales (Figura 2).

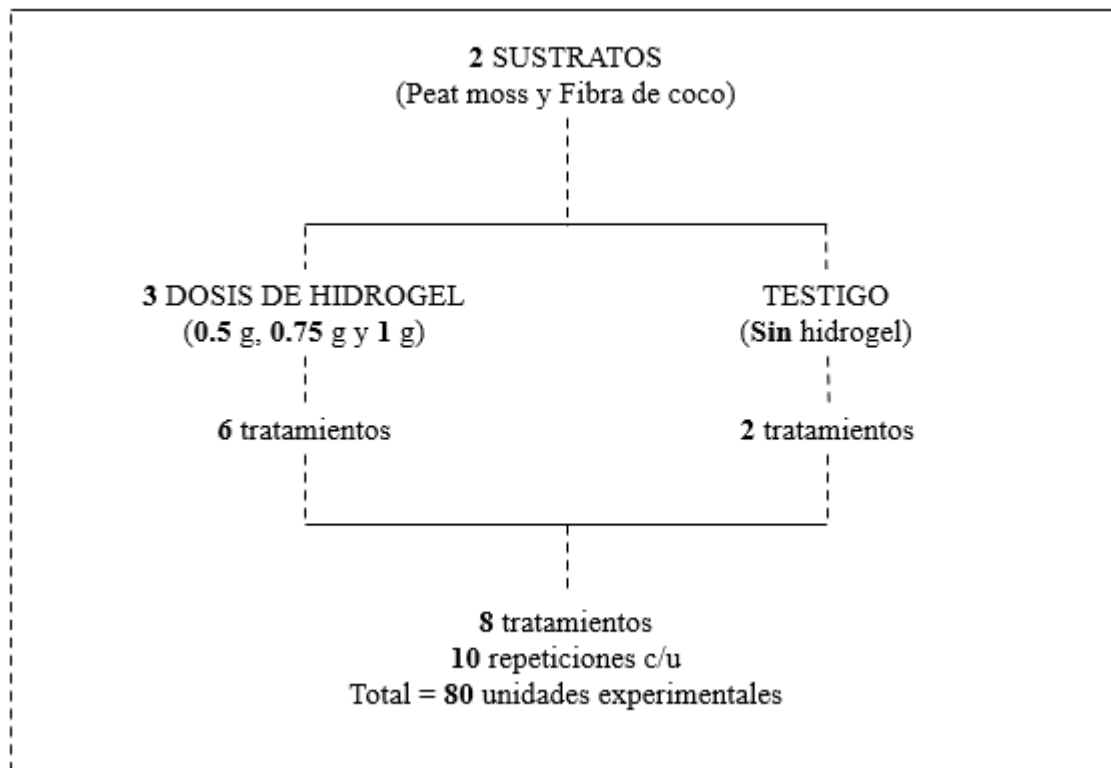


Figura 2. Diseño experimental

5.4.3. Manejo previo al experimento.

Todas las unidades experimentales fueron sometidas a un riego inicial por inmersión durante un periodo de 24 horas, realizado del 3 al 4 de julio, con el fin de asegurar condiciones hídricas homogéneas al inicio del ensayo.

5.4.4. Periodo de evaluación

Las mediciones se realizaron del 3 al 21 de julio de 2025, sin aplicaciones adicionales de riego. Las fechas seleccionadas para el análisis estadístico correspondieron a los días 10 y 18 del periodo experimental. El día 10 se tomó como primer punto de evaluación debido a que el tratamiento “Testigo o T7” elaborado con peat moss, perlita y vermiculita alcanzó el 100% de la pérdida de humedad, constituyendo un punto crítico para establecer comparaciones con los demás tratamientos. La segunda evaluación se realizó el día 18, ya que para entonces la mayoría de los tratamientos se encontraban próximos a alcanzar el 100% de pérdida de humedad. Aunque algunos aún no llegaban completamente a este valor, dicho momento representó el límite práctico del experimento.

5.5. Variables evaluadas

5.5.1. Masa (g)

Registrada diariamente mediante una báscula granataria calibrada.

5.5.2. Humedad relativa del sustrato (%)

Calculada utilizando la expresión;

$$H(\%) = \frac{P_d - P_s}{P_r - P_s} \times 100$$

Nota: $H(\%)$ indica el porcentaje de humedad de la muestra; P_d es el peso diario; P_s el peso seco; y P_r el peso posterior al riego (FAO, 2020).

5.5.3. Temperatura y humedad relativa del ambiente

Registrada diariamente mediante un termómetro digital con sensor de humedad (Steren).

5.6. Análisis estadístico

El diseño experimental fue completamente al azar, de acuerdo:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \epsilon_{ij}$$

Donde μ es el parámetro de escala común a todos los tratamientos, llamado media global, τ_i es el parámetro que mide el efecto del tratamiento i . ϵ_{ij} es el error atribuible a la medición Y_{ij} .

Los datos se analizaron mediante un ANOVA de un factor, empleando el software R (versión 4.5.2). previo al análisis se verificaron los supuestos del modelo mediante:

- Prueba de Shapiro-Wilk para normalidad
- Pruebas de Levene y Bartlett para homogeneidad de varianzas
- Gráficos diagnósticos (QQ-plot y residuos vs valores ajustados)

6. RESULTADOS

6.1. Pérdida de humedad en los tratamientos (Tendencia general)

Las figuras 3 y 4 permiten identificar de forma clara el comportamiento de la pérdida de humedad en los dos sustratos evaluados. En ambas graficas se observa que el peat moss (señalado en color naranja) muestra valores considerablemente mayores de pérdida de humedad en comparación con la fibra de coco (color azul).

Desde los primeros días del experimento, el peat moss presenta un incremento acelerado en la deshidratación, alcanzando porcentajes elevados en un corto intervalo de tiempo. Por el contrario, la fibra de coco mantiene niveles menores de pérdida de humedad, con una progresión más gradual y estable. Esta diferencia en la distribución de los datos evidencia que el comportamiento de los tratamientos es notoriamente distinto y que la capacidad de retención de agua varía entre ellos.

En términos generales, la fibra de coco se muestra como un material con mayor capacidad de retención de humedad, mientras que el peat moss experimenta una deshidratación más rápida e intensa.

6.2. Pérdida de humedad en el tiempo

Día 10

La figura 3 corresponde a las mediciones realizadas hasta el día 10, muestran una separación marcada entre ambos sustratos. El Peat moss alcanza valores entre 20 y 95 % de pérdida de humedad, mientras que la fibra de coco permanece en un intervalo inferior, aproximadamente entre 20 y 55 %. Esta diferencia amplia indica que, aun con la presencia de hidrogel en distintas proporciones, el peat moss continúa perdiendo agua con mayor rapidez.

Por lo que este comportamiento cumple con el propósito del estudio de identificar como responde cada mezcla a la deshidratación. Los tratamientos de fibra de coco demuestran mayor estabilidad y una respuesta más moderada ante la pérdida de humedad, mientras que el peat moss tiende a secarse rápidamente, lo que sugiere una menor permanencia de humedad en el corto plazo.

Día 18

En la figura 4 se observa la progresión hasta el día 18. Aunque la fibra de coco incrementa su pérdida de humedad con el paso del tiempo, su comportamiento sigue siendo más gradual que el del peat moss, manteniéndose por debajo de los niveles incluso desde el día 10.

La dispersión de los datos aumenta en los días finales, lo cual es esperable debido al proceso natural de evaporación. No obstante, el patrón general se mantiene: la fibra de coco requiere más días para llegar a niveles elevados de pérdida de humedad, mientras que el peat moss alcanza estos valores en un periodo mucho más corto.

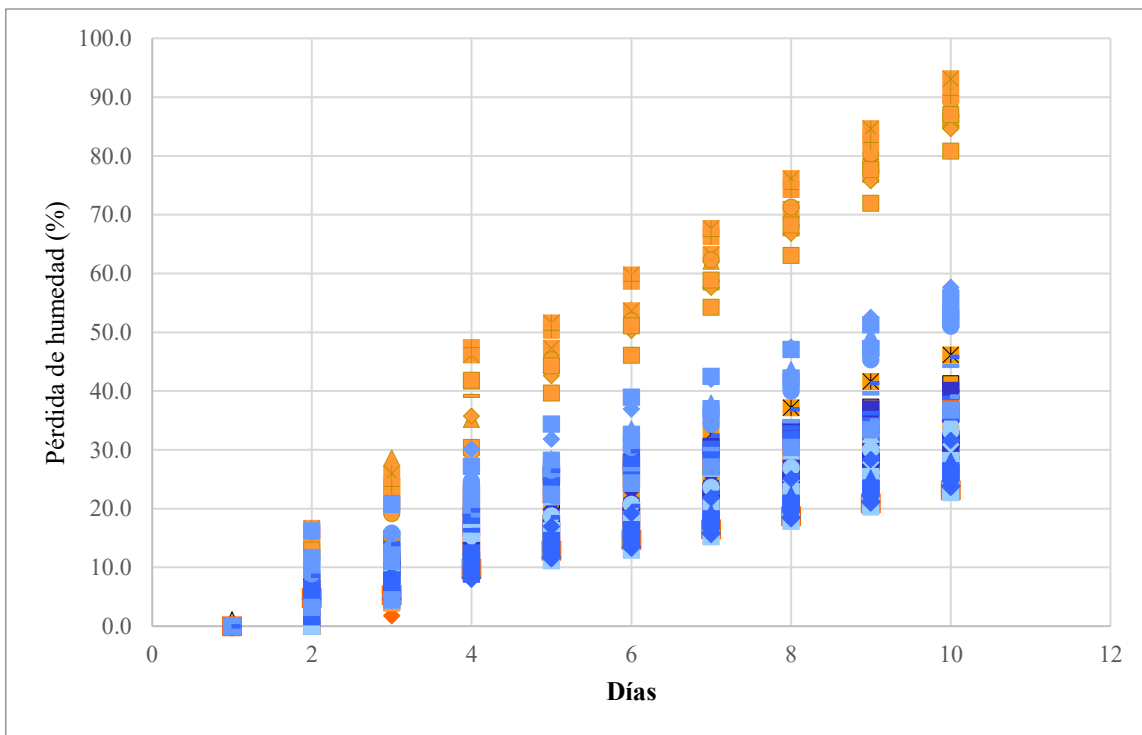


Figura 3. Pérdida de humedad Día 10, fibra de coco (Azul) Peat moss (Naranja)

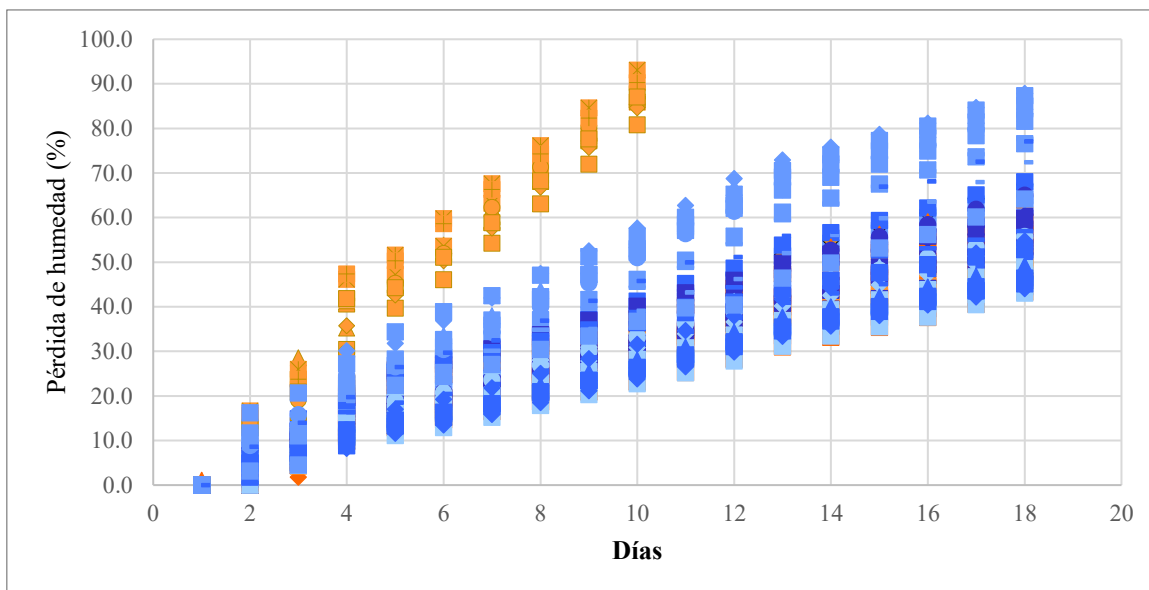


Figura 4. Pérdida de humedad Día 18, fibra de coco (Azul) Peat moss (Naranja).

6.3. Validación de supuestos del modelo

La verificación de los supuestos del modelo se presenta en las tablas 2 y 3. De acuerdo con la prueba de Shapiro-Wilk (Tabla 2), los residuos correspondientes a ambos sustratos en los días 10 y 18 mostraron valores de P superiores a 0.05, lo que indica que se ajustan a una distribución normal. En cuanto a la homogeneidad de varianzas, la prueba de Levene y Bartlett (Tabla 3) mostraron valores de P no significativos en la mayoría de los casos, con excepción de Bartlett para peat moss en el día 18 ($p = 0.478$), aunque sin evidencia de heterogeneidad según Levene. En conjunto, los resultados no indicaron violaciones importantes a los supuestos, por lo que el análisis de varianza puede interpretarse con validez estadística.

Tabla 2. Resultados de la prueba de normalidad Shapiro-Wilk aplicada a los residuos.

Sustrato	Día	Estadístico W	p-valor
Peat moss	10	0.9817	0.7631
Fibra de coco	10	0.9712	0.3914
Peat Moss	18	0.963	0.3768
Fibra de coco	18	0.94652	0.0576

Tabla 3. Resultados de las pruebas de homogeneidad de varianzas (Levene y Bartlett) aplicadas a los residuos.

Sustrato	Día	Prueba	Estadístico	gl	p-valor
Peat moss	10	Levene	0.6174	3	0.6084
Fibra de coco	10	Levene	1.4492	3	0.2447
Peat moss	18	Levene	1.709	2	0.2
Fibra de coco	18	Levene	0.9557	3	0.4241
Peat moss	10	Bartlett	3.0682	3	0.3812
Fibra de coco	10	Bartlett	5.7496	3	0.1244
Peat moss	18	Bartlett	6.08	2	0.0478
Fibra de coco	18	Bartlett	4.2423	3	0.2365

6.4. Análisis de varianza (ANOVA)

6.4.1. Día 10

En el día 10, el análisis de varianza mostró diferencias altamente significativas entre los tratamientos tanto en peat moss como en fibra de coco (Tabla 4). Para peat moss, el ANOVA indico un efecto significativo del tratamiento ($F = 554.42$ $p < 2.2 \cdot 10^{-10}$), lo que evidencia una marcada variación en la pérdida de humedad entre las dosis de hidrogel evaluadas. De manera consistente, en la fibra de coco también se observan diferencias significativas ($F = 33.50$, $p = 7.49 \cdot 10^{-11}$), aunque con una magnitud menor en comparación con el peat moss, lo que refleja un comportamiento más homogéneo entre sus tratamientos. En ambos casos, la variación entre tratamientos fue sustancialmente mayor que la variación residual, lo cual confirma la influencia del hidrogel en la pérdida de humedad en esta etapa.

6.4.2. Día 18

En el día 18, el ANOVA volvió a mostrar diferencias significativas entre tratamientos en ambos sustratos (Tabla 5). En peat moss, el efecto del tratamiento permaneció significativo

($F = 52.29$, $p = 5.18e-10$), aunque con una reducción considerable en la magnitud del valor F respecto al día 10, lo que sugiere que la variabilidad entre tratamientos disminuye conforme avanza la desecación. Por su parte, en la fibra de coco se observaron diferencias altamente significativas ($F = 75.43$, $p = 1.36e-15$), indicando que las distintas dosis de hidrogel mantienen un efecto marcado sobre la pérdida de humedad incluso en etapas avanzadas. La relación entre la suma de cuadrados del tratamiento y la del error demuestra que la variación entre tratamientos continúa siendo dominante en ambos sustratos.

Tabla 4. Resultados del ANOVA para el día 10.

Sustrato	gl Trat.	SC Trat.	CM Trat.	F	p-valor
Peat moss	3	20804.1	6934.7	554.42	< 2.2e-16
Fibra de coco	3	2804.87	934.96	35.50	.749e-11

Tabla 5. Resultados del ANOVA para el día 18.

Sustrato	gl Trat.	SC Trat.	CM Trat.	F	p-valor
Peat moss	2	2005.02	1002.52	52.29	5.18e-10
Fibra de coco	3	6544.2	2181.39	75.43	1.36e-15

6.5. Medias marginales

Las medias marginales estimadas permiten visualizar con claridad las diferencias en la pérdida de humedad entre los tratamientos evaluados. En la Figura 5 se observa que las mezclas elaboradas con fibra de coco (T4, T5, T6 y T8) presentaron valores menores de pérdida de humedad en comparación con las formuladas con peat moss (T1, T2, T3 y T7), lo que indica una mayor capacidad de retención hídrica desde las primeras etapas de evaluación.

Este patrón se mantiene en la Figura 6, donde los tratamientos con fibra de coco continúan mostrando las medias más bajas, mientras que los tratamientos con peat moss registran los valores más elevados dentro del conjunto evaluado. La consistencia entre ambas figuras evidencia la diferencia en el comportamiento hídrico de los sustratos, destacando la ventaja de la fibra de coco para mantener la humedad disponible por mayor tiempo.

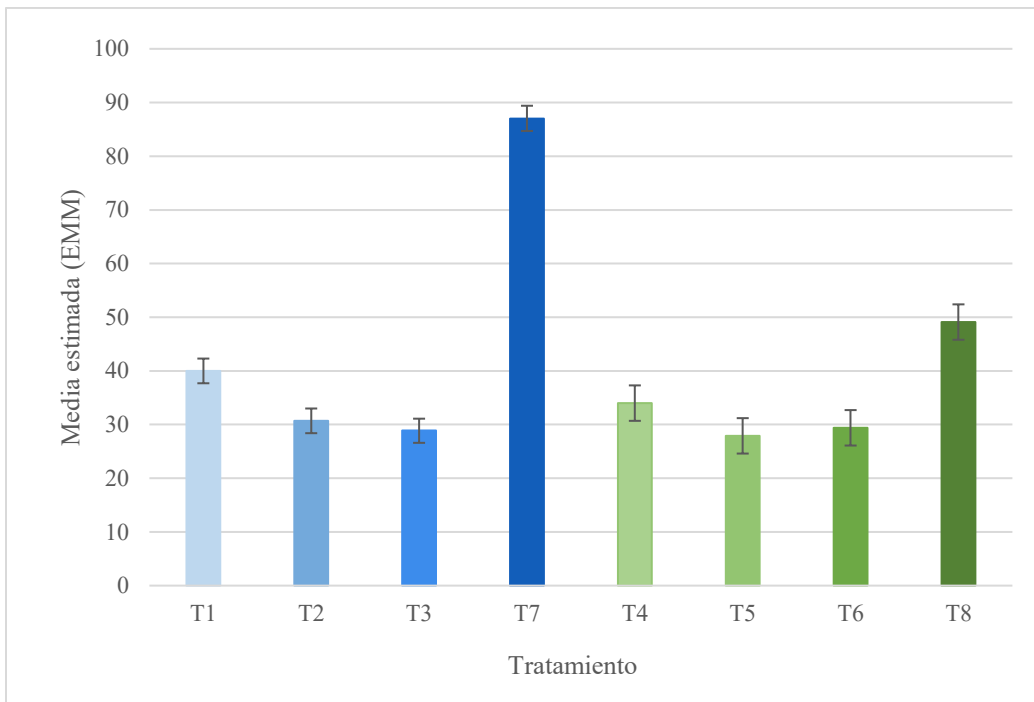


Figura 5. Medias marginales estimadas (IC 95%) de la pérdida de humedad por tratamiento en el día 10.

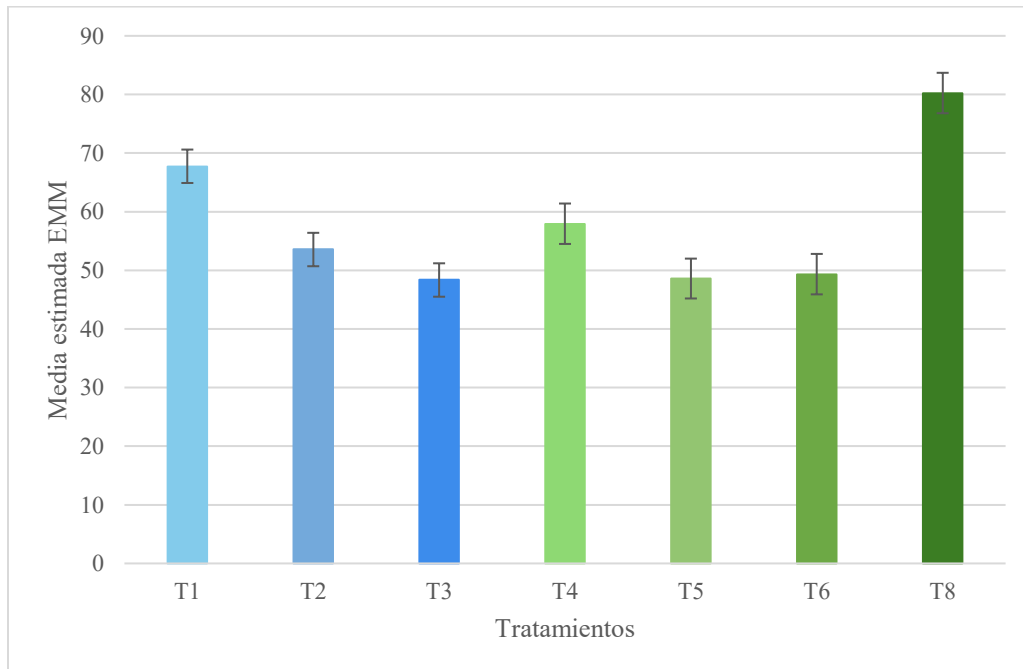


Figura 6. Medias marginales estimadas (IC 95%) de la pérdida de humedad por tratamiento en el día 18.

6.6. Comparaciones múltiples (Tukey HSD)

En el día 10, los tratamientos T3 y T2 de peat moss se agruparon, lo que muestra que ambas dosis de hidrogel produjeron un efecto semejante sobre la retención de agua. El tratamiento T1 se separó de ellos, reflejando una pérdida mayor; y el testigo T7 formó un grupo independiente al ser el que mostró la pérdida de humedad más alta (Tabla 6).

En la fibra de coco, las tres dosis evaluadas (T5, T6, y T4) quedaron en el mismo grupo, lo que sugiere que en este sustrato las cantidades de hidrogel no generaron diferencias marcadas durante los primeros 10 días. El testigo T8, por su parte, mostró un comportamiento significativamente diferente, con mayor pérdida de humedad que los tratamientos con hidrogel.

Para el día 18, los tratamientos de peat moss volvieron a separarse en tres grupos, lo que indica que la pérdida de humedad se incrementó en distintos niveles según la dosis aplicada. En la fibra de coco, los tratamientos T5 y T6 permanecieron agrupados, mientras que T4 y el testigo T8 se ubicaron en grupos distintos, lo que confirma diferencias más claras conforme avanzó el periodo de evaluación (Tabla 7).

Tabla 6. Grupos de Tukey día 10.

Sustrato	Tratamiento	Media	Grupo
Peat moss	T3	28.85	a
Peat moss	T2	30.68	a
Peat moss	T1	40	b
Peat moss	T7	87.04	c
Fibra de coco	T5	27.92	a'
Fibra de coco	T6	29.42	a'
Fibra de coco	T4	33.99	a'
Fibra de coco	T8	49.08	b'

Tabla 7. Grupos de Tukey día 18.

Sustrato	Tratamiento	Media	Grupo
Peat moss	T3	48.37	a
Peat moss	T2	53.58	b
Peat moss	T1	67.72	c
Fibra de coco	T5	48.6	a'
Fibra de coco	T6	49.33	a'
Fibra de coco	T4	57.91	b'
Fibra de coco	T8	80.25	c'

7. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en este estudio evidenciaron diferencias claras en la dinámica de pérdida de humedad entre los dos sustratos evaluados y entre las proporciones de hidrogel aplicadas, lo cual confirma que la capacidad de retención hídrica está determinada tanto por las propiedades físicas del sustrato como por la cantidad de polímero incorporado. En términos generales, la fibra de coco mostró una menor pérdida de humedad a lo largo del periodo experimental, mientras que el peat moss se deshidrató con mayor rapidez, incluso en presencia de hidrogel. Este comportamiento concuerda con lo descrito en el marco teórico, donde se señala que la fibra de coco posee mayor estabilidad estructural, mejor aireación y una liberación de agua más gradual (Reyes Muñiz, 2024), mientras que el peat moss, a pesar de su alta retención inicial, pierde humedad más rápidamente debido a su estructura más ligera y porosa (Hernández Escobar, 2009).

La separación estadística observada en los análisis de Tukey durante los días 10 y 18 indica que las dosis de hidrogel generaron efectos diferenciados según el sustrato. En peat moss, las tres proporciones evaluadas mostraron variaciones significativas, lo que sugiere que este material es más sensible a los cambios en la cantidad de polímero. Esto coincide con lo señalado por Rivera Fernández (2018), quien menciona que la interacción hidrogel-sustrato puede variar según la textura y la compactación del medio. Además, la rápida deshidratación del peat moss observada en el estudio explica que el hidrogel, al encontrarse sometido a un ambiente de evaporación más intenso, no alcanzara un comportamiento uniforme entre dosis. Este fenómeno también es compatible con los hallazgos de Wang (1990), quien reportó que los hidrogeles tardan más tiempo en alcanzar su hidratación completa en medios con menor disponibilidad de humedad.

En contraste, en la fibra de coco las dosis de hidrogel mostraron un comportamiento más homogéneo durante los primeros diez días, coincidiendo con lo reportado por Barbaro (2015), quien señala que, en sustratos con alta estabilidad física, los incrementos en la dosis de hidrogel no generan contrastes marcados en la retención de agua. Esta respuesta sugiere que la fibra de coco posee una estructura capaz de regular la liberación de humedad de manera uniforme, aun cuando se incorporan cantidades distintas de polímero. Sin embargo, hacia el día 18 se observaron diferencias entre los tratamientos, lo cual indica que, conforme avanza

la deshidratación, el efecto del hidrogel comienza a distinguirse más claramente. Esto coincide con lo reportado por Jahangir Abedi Koupai (2008), quien encontró que las dosis más altas de hidrogel prolongan la humedad conforme se acerca el punto de marchitez.

Un hallazgo relevante fue que el tratamiento testigo de peat moss alcanzó el 100 % de pérdida de humedad alrededor del día 10, mientras que los demás tratamientos, especialmente aquellos con fibra de coco, conservaron entre el 50 y 80 % incluso al día 18. Esto respalda lo expuesto por Nandi y Brave (2011), quienes señalan que la retención de humedad prolongada favorece la estabilidad hídrica y reduce la necesidad de riegos frecuentes. También coincide con los trabajos de Hernández (2007) y K. C. Taylor (1986), quienes demostraron que la adición de hidrogel reduce la frecuencia de riego entre un 40% y un 60%, dependiendo del sustrato.

La tendencia progresiva de pérdida de agua en ambos sustratos era un comportamiento esperado debido al proceso natural de evaporación, pero la velocidad con la que ocurrió en el peat moss fue mayor que la anticipada. Una posible causa es que, durante el riego inicial por inmersión, el peat moss podría haber absorbido un exceso de agua que luego liberó rápidamente por capilaridad. Otra explicación es que su mezcla con perlita y vermiculita, ambos materiales con menor retención hídrica hayan reducido la permanencia de la humedad, tal como sugieren Ballester (1999) y Martínez (2011) al describir la influencia de los componentes minerales en la aireación y drenaje.

También es importante considerar el límite funcional del hidrogel. Kuneski (2025) advirtió que, aun cuando se aumentó la dosis, el polímero no puede expandirse completamente si la estructura del sustrato restringe su hinchamiento. Esto podría explicar por qué las diferencias entre 0.75 g y 1 g no siempre fueron tan amplias. Asimismo, los datos sugieren que el hidrogel actuó como un estabilizador de humedad, pero no como un elemento capaz de modificar por completo la tendencia natural de desecación del peat moss.

En cuanto a las limitaciones del estudio, es importante señalar que el experimento se realizó sin presencia de planta, por lo que las tasas de evaporación corresponden únicamente al comportamiento físico del sustrato. La incorporación de las raíces modificaría la dinámica del agua debido a la absorción y a la interacción con la estructura del medio (Prieto-Ruíz, 2012). Asimismo, las mediciones se desarrollaron bajo condiciones ambientales

relativamente constantes; en viveros comerciales, la variabilidad de temperatura y radiación podría generar tasas de deshidratación distintas.

8. CONCLUSIÓN

Los resultados de este estudio demostraron que la retención de humedad varía de manera importante entre los sustratos evaluados y que la incorporación de hidrogel influye en la velocidad con la que se pierde el agua. La fibra de coco mostró un comportamiento más estable y una deshidratación más lenta durante todo el periodo de evaluación, mientras que el peat moss presentó pérdidas rápidas, incluso en presencia del polímero. Estos hallazgos confirman que las propiedades físicas del sustrato determinan de manera directa la duración de la humedad disponible.

En cuanto a las proporciones de hidrogel, se observó que su efecto fue más evidente en el peat moss, con diferencias claras entre las dosis. En la fibra de coco, las variaciones entre tratamientos fueron menores al inicio, aunque se hicieron más notorias hacia el día 18. Esto responde a la pregunta central del estudio; sí existe un efecto del hidrogel en la pérdida de humedad, pero este efecto depende del sustrato y del tiempo transcurrido desde la hidratación inicial.

Los objetivos planteados se cumplieron satisfactoriamente. Pues fue posible medir la pérdida de humedad en ambos sustratos, identificar el tiempo en el que se acercan al punto crítico de deshidratación y evaluar la eficacia del hidrogel en cada mezcla. Asimismo, se demostró que el hidrogel ayuda a prolongar la humedad, pero su eficiencia no es uniforme y presenta un límite funcional dentro de cada sustrato, tal como lo indican estudios previos.

9. RECOMENDACIONES

- Evaluar el desempeño del hidrogel en presencia de especies con alta demanda hídrica, con el fin de determinar si la actividad fisiológica de las raíces modifica los tiempos de deshidratación.
- Realizar ensayos con distintos programas de fertilización para medir cuanto nutriente es retenido y liberado por el hidrogel.
- Evaluar la influencia del tamaño de partícula del hidrogel y del sustrato sobre la velocidad de hidratación y liberación de agua.
- Extender el periodo de evaluación a ciclos más largos con el fin de analizar la degradación gradual del hidrogel y su capacidad de retención con el paso del tiempo.
- Evaluar el rendimiento del hidrogel bajo sistemas de riego utilizados en viveros, con el fin de determinar si este método permite una hidratación adecuada del polímero.

Bibliografía

- Abad, M. F. (2005). Physical properties of various coconut coir dusts compared to peat. *HortScience*, 40(7), 2138-2144.
- Akhter, J. M. (2004). Effects of hydrogel amendment on water storage of sandy loam and loam soils and seedling growth of barley, wheat and chickpea. *Plant Soil and Environment*, 50(10), 463-469.
- Ali, K., Asad, Z., Agbna, G., Saud, A., Khan, A., & Zaidi, S. (2024). Progress and Innovations in Hydrogels for Sustainable Agriculture. *Agronomy*, 14, 2815.
- Altmann, M. (2008). . Socio-economic impact of the peat and growing media industry on. *Study commissioned by EPAGMA*.
- Amashta, I. A. (2005). Hidrogeles inteligentes . *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 2: 35-50.
- ARENAS, M., VAYRINA, C. S., CORNELL, J. A., HANLON, E. A., & HOCHMUTH. (2002). Coir as an alternative to peat in media for tomato. *HortScience* , 37(2): 309-312.
- Arévalo, M. E. (2016). Inclusión de musgo (*Sphagnum magellanicum* Brid.) y fibra de coco como componentes orgánicos del sustrato para almácigos de kiwi (*Actinidia deliciosa*). *Idesia (Arica)*,, 34(2), 47-55.
- Arnau, J. B. (2012). Efecto de la violación de la normalidad y esfericidad en el modelo lineal mixto en diseños split-plot. . *Psicothema*, 24(3), 449-454.
- Arredondo Peñaranda, A. &. (2009). Hidrogeles: Potenciales biomateriales para la liberación controlada de medicamentos. . *Revista Ingeniería Biomédica*, 3(5), 83-94.
- Ávila-Flores¹, I. J., Prieto-Ruíz^{*2}, J. A., Hernández-Díaz¹, J. C., & Christian. (n.d.). *PREACONDICIONAMIENTO DE Pinus engelmannii Carr. MEDIANTE DÉFICIT DE RIEGO EN VIVERO . MEDIANTE DÉFICIT DE RIEGO EN VIVERO :* Universidad Juárez del Estado de Durango.

- Ballester, J. (1999). Substratos para el cultivo de plantas ornamentales. *Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid*.
- Barbaro, L. A. (2015). Efecto del uso de hidrogel en un sustrato formulado con turba Sphagnum y otro con turba subtropical para la producción de plantines de *Impatiens walleriana*. *Agriscientia*, 32(2), 123-129.
- Basave Villalobos, E. G. (2016). Calidad de planta de *Cedrela odorata* L. asociada con prácticas culturales de vivero. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 7(36), 65-80. Retrieved from <https://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v7n36/2007-1132-remcf-7-36-00065.pdf>
- Brady, N. C. (2017). *The Nature and Properties of Soils*, 15th Edn. *Pearson Education*.
- Cabot, P. (2022). El ahorro de agua en jardinería. *Departamento de Genética Vegetal, IRTA-Cabrils. Crta. de Cabrils s/n, 08348 Barcelona*.
- Carlos Baixauli Soria, J. M. (2002). *Cultivo sin Suelo de Hortalizas Aspectos Prácticos y Experiencias*. Valencia: GENERALITAT VALENCIANA, Conselleria de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- CRISTINA, Z. H. (2023). *Comportamiento germinativo y crecimiento en vivero de Quercus insignis Mart. & Gal, (Fagaceae)*. Los Reyes Iztacala: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Crous, J. W. (2017). Use of hydrogels in the planting of industrial wood plantations. *Southern Forests: a Journal of Forest Science*, 79(3), 197-213. Retrieved from <https://doi.org/10.2989/20702620.2016.1221698>
- CRUZ CRESPO, E. L. (2013). *Sustratos en la horticultura*. CONACYT.
- Cruz, V. M. (2024). *Aplicación de hidrogel en la producción de mudas de quiabo*. OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA.
- Deminski, L. B. (2024). *APLICAÇÃO DE HIDROGEL COM DOSIS DE SULFATO DE POTÁSSIO NO DESENVOLVIMENTO DA SOJA*. *Revista Políticas Públicas & Cidades*.

- Dumroese, R. K. (2009). *Nursery manual for native plants: a guide for tribal nurseries (No. 730)*. . Washington, D.C.: U.S.: Department of Agriculture, Forest Service.
- Dumroese, R. K. (2012). Riego y fertirriego. In: Contardi, L.; Gonda, H., coord. Produccion de plantas en viveros forestales. . *Buenos Aires: Consejo Federal de Inversiones; Comodoro Rivadavia: Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco UNPSJB; Comodoro Rivadavia: Centro de Investigacion y Extension Forestal Andino Patagonico, Argentina. p., 115-125., 115-125.*
- Evangelista, N. L. (2019). Solución del Poliacrilato de Sodio en H₂O. *Ingenia Materiales*, (1), 33-37.
- F. Yazdani, I. A. (2007). Impact of superabsorbent polymer on yield and growth analysis. *Pakistan J. Biol. Sci. PJBS*, vol. 10, no. 23,.
- FAO. (2020). Soil water content: Gravimetric method - field exercises . *Food and Agriculture Organization of the United Nations*.
- Fry, J. D. (1981). Water management during tall fescue establishment. . *HortScience*, 24(1), 79-81.
- García-Moreno, A. C.-R.-G.-A.-S.-C. (2024). *Acrilato de potasio para reducir el uso de agua en tomate de invernadero*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*.
- Hernández Escobar, J. L. (2009). Propiedades hídricas de mezclas de sustratos con diferentes proporciones y tamaños de partícula (Master's thesis). *INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS*.
- Hernández Estrada, G. (2011). Producción de plántulas de brassicas con sustrato de peat moss, lombricomposta y tierra de mezquite. *UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ*.
- HERNANDEZ, O. G. (2007). HIDROGELES MEJORADORES DE CULTIVOS AGRÍCOLAS . *Centro de Investigación en Química Aplicada. Coahuila, México*, 17-20.
- INEGI. (2002). Saltillo Coahuila de Zaragoza. Cuaderno estadístico municipal. 211.

- Iván Quiroz Marchant, E. G. (2009). Vivero Forestal: Producción de Plantas Nativas a Raíz Cubierta. *Reforestation, Nurseries, & Genetic Resources*.
- J.L. Escobar, D. G. (2002). HIDROGELES. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS EN EL DISEÑO DE SISTEMAS DE LIBERACIÓN CONTROLADA DE FÁRMACOS. *Revista Iberoamericana Polímeros*.
- Jerzy Grabiński, M. W. (2018). THE EFFECT OF SUPERABSORBENT POLYMER APPLICATION ON YIELDING OF WINTER WHEAT (TRITICUM AESTIVUM L. *AGRICULTURAL SCIENCES*.
- K. Reyna Maldonado-Benitez, A. A.-U.-H.-A. (2011). PRODUCCIÓN DE *Pinus greggii* Engelm. EN MEZCLAS DE SUSTRATO CON HIDROGEL Y RIEGO, EN VIVERO. *SCIELO*.
- K.C. Taylor, R. H. (1986). The Effect of Hydrophilic Polymer on Media Water Retention and Nutrient Availability to *Ligustrum lucidum*. *HortScience* , 21(5): 1159—1161.
- Kaur, H. G. (2024). *Hydrogels as a potential biomaterial for multimodal therapeutic applications*. . *Molecular Pharmaceutics*, 21.
- Kobs, E. B. (2024). EVALUACIÓN DE SUSTRATOS ORGÁNICOS ALTERNATIVOS EN LA PRODUCCIÓN HIDROPÓNICA DE JITOMATE (*Solanum lycopersicum* L.). *UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO, DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA* .
- Koupai, J. A. (2008). Enhancing the available water content in unsaturated soil zone using hydrogel, to improve plant growth indices. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 8(1), 67-75.
- Kovalsky París, G. M. (2004). Respuestas genéticas de las plantas al estrés hídrico. *Universidad de los Andes, Facultad de Ciencias, Departamento de Biología* .
- Kuneski, A. C. (2025). Tissue Paper-Based Hydrogels for Soil Water Maintenance and Nitrogen Release. *Gels*, 11(8), 599. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/gels11080599>

- LANDIS T.D., T. R. (1989). Seedling nutrition and irrigation. Vol. 4. container tree nursery manual. *USDA, Forest Service. Agric. Handbk.*, 674.
- Landis, T. D. (2012). Applications of hydrogels in the nursery and during outplanting. *National Proceedings: Forest and Conservation Nursery Associations-2011*. (págs. 53-58.). Haase, DL; Pinto, JR; Riley, LE (coords.) → editores de las actas de la conferencia/proceedings.: USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station. Obtenido de https://www.fs.usda.gov/rm/pubs/rmrs_p068/rmrs_p068_053_058.pdf
- Leciejewski, P. (2009). The effect of hydrogel additives on the water retention curve of sandy soil from forest nursery in Julinek. *Journal of water and land development*, 239-247. doi:10.2478/v10025-010-0031-8
- LOPEZ, P. (2010). *Manual de viveros. Producción de mudas de especies forestales*. San Lorenzo Paraguay: Proyecto JIRCAS-Estudio de la Validación de Medidas contra el Calentamiento Global basado en la Forestación y Reforestación MDL.
- Maheshwari, B. (2016). Understanding the Performance of Irrigation Systems Around Homes. *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING AND LANDSCAPE MANAGEMENT*, 24(04): 278–292.
- Martínez, P. F. (2011). Sustratos para el cultivo sin suelo. Materiales, propiedades y manejo. 37-77.
- Masiá, E. S. (2016). *Síntesis y caracterización de hidrogeles inyectables inspirados en la matriz extracelular para la regeneración de tejidos blandos*. Universitat Politècnica de València, España. : Ingeniería química Master.
- Medrano. (2007). Eficiencia en el uso del agua por las plantas. *Investigaciones geográficas (Esp)*, (43), 63-84.
- Medrano H., B. J.-C. (2007). Eficiencia en el uso del agua por las plantas. *Investigaciones geográficas (Esp)*, (43), 63-84.
- Montgomery, D. (2017). *Design and Analysis of Experiments Arisona, State University*. New York: Ninth Edition, John Wiley & Sons.

- Montserrat, J. (2005). Sistemas de riego para uso en viveros. *viveros*.
- Moreno, F. &. (2009). Respuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico. . *Una revisión. Agronomía colombiana*, 27(2), 179-191.
- Muhammad, M. T. (2024). Review of design and manufacturing of superabsorbent polymers (SAPs) hydrogel for agriculture in arid areas. *Discov Mater*, 4, 43. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s43939-024-00114-5>
- Nations, F. a. (2020). Soil water content: Gravimetric method - field exercises. *FAO*.
- Navarra., M. d. ((s.f)). "*POLIACRILATO DE SODIO: el secreto del pañal*". <https://museodeciencias.unav.edu/documents/11140003/32632495/poliacrilato-sodio.pdf/c741f472-7aa3-1e21-f4e8-df23d39eb29a?t=1588932764000#:~:text=El%20poliacrilato%20suele%20estar%20distribuido,de%20la%20marca%20del%20mismo.&text=Cuando%20se%20encuentra%20: Museo de Ciencias Universidad de Navarra>.
- Neethu, T. M. (2018). *Prospects and applications of hydrogel technology in agriculture. Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci.* Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci.
- Nnadi, F., & Brave, C. (2011). . Environmentally friendly superabsorbent polymers for water conservation in agricultural lands. . *J. Soil Sci. Environ. Manag.*, 2, 206–211.
- Pardos, J. A. (2004). Respuestas de las plantas al anegamiento del suelo. *Forest Systems*, 13(4), 101-107.
- Pedro Florián Martínez, D. R. (2011). *Sustratos para el cultivo sin suelo. Materiales, propiedades y manejo*. Universidad Nacional de Colombia.
- Prieto-Ruiz, J. Á.-R. (2012). Efecto del Estrés Hídrico en Pinus Cooperi Blanco Durante su Peacondicionamiento en Vivero. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales.*, 3(12), 19-28.
- Quiñones, J. R. (2015). *Manual diseño y organización de viveros*. Santo Domingo, República Dominicana.: Clúster de Viveristas Dominicano.

- Ramírez Galicia, K. L. (2022). *Prototipo de vivero forestal con fertirriego por subirrigación*. Revista Mexicana de Ciencias Forestales.
- Reinikainen, O. K. (2012). Harvesting of Sphagnum biomass and its use as a growing medium constituent. . *Proceedings of the 14th international peat congress* (pp. pp. 1-6). Stockholm: International Peat Society.
- Reyes Muñiz, A. V. (2024). Efecto de bioestimulantes en producción de plantas de maracuyá (*Passiflora edulis*) con sustrato de fibra de coco en etapa de vivero (Bachelor's thesis, Jipijapa-Unesum).
- Rios Anaya, I. V. (2019). Uso de hidrogel en plántulas de *Cariniana pyriformis* sometidas a diferentes regímenes hídricos. *Trabajo de Grado, Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ciencias, Escuela de Biología*. Retrieved from <https://repository.agrosavia.co/home>
- Rivera Fernández, R. D. (2018). Absorción de agua de hidrogel de uso agrícola y su humedecimiento de tres tipos de suelo. . *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo*, 50(2), 15-21.
- Rivera, V. J. (2012). GERMINACIÓN DE LAS SEMILLAS DE *Pinus oocarpa* Schiede UTILIZANDO RIEGO CON AGUA RESIDUAL SEDIMENTADA. *Agua, Saneamiento & Ambiente*, 7(1), 36-40.
- Rizwan M, R. G. (2021). Synthesis, polymerization process and soil conditioning properties in agricultural field. *J Adv Res.*, 17;33:15-40.
- Robles, A. A. (2007). Sobrevivir al estrés: cómo responden las plantas a la falta de agua. *Biotecnología*, 14, 253-262.
- Ruíz, J. P. (2004). Estrés hídrico en *Pinus engelmannii* Carr., producido en vivero. *Investigación agraria. Sistemas y recursos forestales*, 13(3), 443-451.
- Salceda, L. F. (2018). Preparación, caracterización y evaluación de hidrogeles como sistemas de liberación controlada de nitratos . *Universidad de Almería*.

- Sánchez, F. J. (1995). OBTENCION DE HIDROGELES DERIVADOS DEL ACIDO ITACONICO. *Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Colombia*.
- Silva, J. B. (2024). *Hidrogel asociado a niveles de humedad del solo no cultivo de Eucalyptus urograndis*. Ciencia Florestal.
- Steduto, P. C. (2012). *Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua*. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Szot, W. M. (2001). Influence of superabsorbents on the physical properties of horticultural substrates. *Int. Agrophysics*, 15, 87-94.
- T.M. Neethu, P. D. (2018). Prospects and Applications of Hydrogel Technology in Agriculture. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* , 7(05): 3155-3162.
- Takahashi, M. T. (2025). Water Retention by Superabsorbent Polymers Enhances Tree Seedling Establishment but Is Insufficient for Survival Under Drought Conditions. *Ecohydrology*, 18(7), e70118.
- Thomas D. Landis, R. W. (1995). *Manual de Viveros para la Producción de Especies Forestales en Contenedor* . Washington, DC: Departamento de Agricultura de los Estados Unidos .
- Varela, S. M. (2013). Sustratos alternativos en la producción de plantines forestales. *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria; Presencia*, 60; 10-2013; 36-39.
- Visaguirre, J. P. (2024). Evaluación del efecto de hidrogel en la germinación y establecimiento de algarrobo dulce (*Prosopis flexuosa* DC) para actividades de reforestación de bosques degradados de zonas áridas de San Juan. *Universidad Nacional de San Juan. Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales*.
- Wang, Y. T. (1990). Hydrophilic polymers—Their response to soil amendments and effect on properties of a soilless potting mix. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 115(6), 943-948.

- Wanjiru, M. M. (2018). Comparative Study of Seedlings Growth Performance in the Nursery with and Without Hydrogels. *Global Advanced Research Journal of Agricultural Science*, Vol. 7(8) pp. 239-244. Retrieved from <https://garj.org/journal/garjas>
- Zhu, J. Z. (2024). sorbent hydrogels derived from agro waste materials for sustainable agriculture: a review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 72(41), 22399-22419.
- Zuluaga Corrales, F. V. (2006). Síntesis y estudio de hidrogel de acrilamida/ácido metacrílico y su aplicación en la liberación de. *El Hombre y la Máquina*, núm. 27.
- Zúñiga Cabezas, A. F. (2017). Comparación de eficiencias entre el sistema de riego por aspersión y un prototipo del sistema de riego por subirrigación en el vivero la Florida del Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis. *UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS*.