



Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado
Facultad de Ingeniería Agrícola
Programa de Magíster en Ingeniería Agrícola

Evaluación de un Hidrogel superabsorbente de origen natural sobre la capacidad de retención de humedad en suelos de textura gruesa

Tesis para optar al grado de Magíster en Ingeniería Agrícola

Diego Manuel Palma Palavecinos
CHILLÁN-CHILE
2024

Profesor Guía: Octavio Lagos Roa
Dpto. de Recursos Hídricos
Facultad de Ingeniería Agrícola
Universidad de Concepción
Profesor Co-Guía: Bruno Urbano Cantillana
Dpto. de Polímeros
Facultad de Ciencias Químicas
Universidad de Concepción

Esta tesis ha sido realizada en el Departamento de Recursos Hídricos de la Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción.

Profesor Guía

Dr. Octavio Lagos Roa
Facultad de Ingeniería Agrícola
Universidad de Concepción

Profesor Co-Guía

Dr. Bruno Urbano Cantillana
Facultad de Ingeniería Agrícola
Universidad de Concepción

Comisión Evaluadora:

Dr. Juan Hirzel Campos
Instituto de Investigación Agropecuarias

Dr. José Luis Arumí Ribera
Facultad de Ingeniería Agrícola
Universidad de Concepción

Dr. Marco Sandoval Estrada
Facultad de Agronomía
Universidad de Concepción

Director de Programa

Mg. Pedro Melin Marin
Facultad de Ingeniería Agrícola
Universidad de Concepción

ÍNDICE

RESUMEN.....	VI
ABSTRACT	VII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. HIPÓTESIS.....	10
3. OBJETIVOS.....	10
3.1. Objetivo general	10
3.2. Objetivos específicos.....	10
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	11
4.1. Suelos	11
4.1.1. Granulometría	12
4.2. Polímeros superabsorbentes.....	14
4.3. Obtención de la curva de retención de humedad de suelo mediante el método de la olla a presión	15
4.4. Humedad aprovechable (AWC, siglas en inglés).....	17
4.5. Tiempo requerido para alcanzar PMP	18
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	20
5.1. Curva de retención de humedad	20
5.2. Humedad aprovechable (AWC).....	26
5.3. Tiempo requerido para alcanzar punto de marchitez	33
6. CONCLUSIÓN.....	38
7. LITERATURA	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicaciones de los puntos de muestreo de los cuatro suelos (A, AF, FA y FL) en estudio. Fuente: Elaboración propia.....	12
Figura 2. Agitador mecánico con tamices de diferentes medidas. Fuente: Elaboración propia.....	13
Figura 3. Olla a presión y platos de succión. Fuente: Elaboración propia.....	14
Figura 4. Diagrama de sensores de humedad y potencial mátrico. Fuente: Elaboración propia.....	20
Figura 5. Mediciones de la curva de retención de humedad de los suelos en estudio con diferentes concentraciones de TG. Fuente: Elaboración propia.	22
Figura 6. Mediciones de la curva de retención de humedad de los suelos en estudio con diferentes concentraciones de COM. Fuente: Elaboración propia.....	23
Figura 7. Comparación de la curva de retención de humedad de diferentes texturas de suelo para cuatro concentraciones de TG. Fuente: Elaboración propia.....	25
Figura 8. Comparación de la curva de retención de humedad de diferentes texturas de suelo para cuatro concentraciones de COM. Fuente: Elaboración propia.....	26

Figura 9. Capacidad de Campo (CC) y Punto de Marchitez Permanente (PMP) de los suelos en estudio con diferentes concentraciones de TG. Fuente: Elaboración propia.	28
Figura 10. Capacidad de Campo (CC) y Punto de Marchitez Permanente (PMP) de los suelos en estudio con diferentes concentraciones de COM. Fuente: Elaboración propia.....	30
Figura 11. Comparación de TG y COM en la humedad aprovechable (AWC) para suelos en estudio con diferentes concentraciones. Fuente: Elaboración propia.....	32
Figura 12. Fracción de tiempo usando TG y COM con diferentes concentraciones en suelos bajo estudio. Fuente: Elaboración propia.....	34
Figura 13. Variación de la succión con el tiempo para los suelos con diferentes concentraciones de TG. Fuente: Elaboración propia.	36
Figura 14. Variación de la succión con el tiempo para suelos con diferentes concentraciones de COM. Fuente: Elaboración propia.	38
 ÍNDICE DE TABLAS	
Tabla 1. Propiedades físicas para los suelos en estudio.	13
Tabla 2. Humedad aprovechable (%) para diferentes concentraciones de hidrogel en todos los suelos bajo estudio.	33

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido parcialmente apoyada por el proyecto FONDEF IDeA ID21110274, el Consorcio Tecnológico del Agua CoTH2O y el Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y Minería CRHIAM ANID/FONDAP/15130015 y ANID/FONDAP/1523A0001.

Agradezco al Dr. Octavio Lagos por la confianza depositada y los valiosos aportes que hicieron posible este trabajo y mi desarrollo como profesional. Agradezco a Don Carlos Cea y Felipe Recabal del Laboratorio de Recursos Hídricos por apoyarme en la parte experimental de esta investigación. Agradezco a mi núcleo familiar: Rosa, Ramón y Andrés que son mi pilar fundamental. Expreso mi gratitud a mi tía Elba Leonor y sus hijos por su apoyo incondicional.

RESUMEN

La disponibilidad de agua, un factor vital en la agricultura, está amenazada por la escasez causada por sequías, desertificación y cambio climático. En este contexto, los hidrogeles, polímeros con una notable capacidad de absorción y retención de agua, se presentan como soluciones clave para mejorar la eficiencia del agua de riego. Este estudio investigó el efecto de un polímero superabsorbente natural (TG) y otro comercial (COM) en 4 concentraciones diferentes (0.3%, 0.5%, 0.8% y 1.0%) sobre la capacidad de retención de humedad en tres suelos de textura gruesa y un suelo de textura media. La evaluación mostró que ambos polímeros aumentan la curva de retención de humedad, aunque se observaron valores de humedad más altos con TG. Se comparó la adición de ambos hidrogeles en el aumento del agua disponible (AWC, por sus siglas en inglés). Para suelos arenosos, TG obtuvo una diferencia estadísticamente significativa de un 26% más de AWC en comparación con el polímero superabsorbente COM. Suelos con un mayor porcentaje de arena tienden a obtener una mayor mejora en AWC. Existe una relación proporcional en el aumento de la AWC al incrementar la concentración de hidrogel ($R^2=0.74$). El suelo arenoso con una concentración del 0.5% de hidrogel TG mostró un 17.8% de AWC, mientras que para una concentración del 1.0% de este hidrogel, se obtuvo un valor del 35.8% de AWC. Sin embargo, en suelos con mayor contenido de arcilla, como los suelos limosos, el efecto fue menor. Finalmente, se comparó el tiempo necesario para alcanzar el punto de marchitez permanente (PMP). El suelo areno francoso aumentó el tiempo para alcanzar PMP en más de 3 veces usando TG o COM en comparación con el mismo suelo sin ninguna concentración de hidrogel. En conclusión, TG mejora

significativamente la retención de humedad en suelos de textura gruesa y media, lo que lo convierte en una solución prometedora para mejorar la eficiencia en el uso del agua en agricultura, especialmente en regiones afectadas por la sequía. Sin embargo se necesitan estudios de campo adicionales para evaluar su durabilidad a largo plazo y su compatibilidad ambiental, asegurando su aplicabilidad en condiciones agrícolas reales.

ABSTRACT

Water availability, a vital factor in agriculture, is being threatened by shortages caused by droughts, desertification, and climate change. In this context, hydrogels, polymers with high water absorption and retention capacity, emerge as key solutions to improve water use efficiency in irrigation. This study investigated the effect of a natural superabsorbent hydrogel (TG) at different concentrations (0.3%, 0.5%, 0.8%, and 1.0%) on the water retention capacity in three coarse-textured soils and one medium-textured soil. Results are compared to an existing commercial polymer (COM). The evaluation shows that both polymers increase the values of the water retention curve, however higher values were observed with TG. The addition of both hydrogels was compared in the increase of the available water capacity (AWC). For sandy soil, TG obtained a statistically significant difference of 26% more AWC when compared to the COM superabsorbent. Soils with a higher percentage of sand tend to obtain a greater improvement in AWC. There is a proportional relationship in the increase of AWC when increasing hydrogel concentration ($R^2=0.74$). Sandy soil with a concentration of 0.5% of TG hydrogel showed 17.8% of AWC, while for a concentration of 1.0% of this hydrogel, a value of 35.8% of AWC was obtained. However, in soils with higher clay content, such

as silt loam, the effect was smaller. Finally, the time required to reach permanent wilting point (PWP) was compared. The loam sandy soil increased the time to reach PWP by more than 3 times using TG or COM when compared to the same soil without any hydrogel concentration. In conclusion, TG significantly improves water retention in coarse and medium-textured soils, making it a promising solution for improving water efficiency in agriculture, especially in drought-affected regions. However, additional field studies are needed to evaluate its long-term durability and environmental compatibility, ensuring its applicability under real agricultural conditions.

1. Introducción

La agricultura de regadío está expuesta a múltiples riesgos de producción. Entre ellos destacan los relacionados con las sequías hidrológicas (es decir, caudales por debajo de lo normal), que implican lagunas en el suministro de agua de riego (Marcomini *et al.*, 2017). Bajo estos eventos climáticos, los regantes no pueden satisfacer plenamente sus necesidades de agua para los cultivos, lo que conlleva pérdidas significativas para los agricultores individuales (producción e ingresos), así como problemas para la sociedad en su conjunto (caídas en la generación de riqueza y empleo rural, y robo de agua que exacerba la sobreexplotación de las masas de agua) (OCDE, 2016). Los principales efectos de la sequía en la agricultura son los problemas en los regadíos y la disminución de rendimientos en los cultivos.

El gradiente de potencial hídrico se refiere a la variación en el potencial de agua en el suelo a medida que se mueve desde el suelo más húmedo hacia el más seco. En suelos de textura gruesa, como la arena o la grava, la capacidad de retención de agua es limitada debido a la falta de partículas finas y espacios de retención de agua. Esto significa que estos suelos no pueden retener grandes cantidades de agua, y el agua que está disponible tiende a drenar rápidamente, lo que reduce la cantidad de agua aprovechable para las plantas. En este contexto, suelos de textura gruesa con bajas capacidades de retención de agua pueden resultar en condiciones de sequía más frecuentes para las plantas, ya que el agua se agota rápidamente y no está disponible en cantidades suficientes para satisfacer las necesidades hídricas. Esto puede tener un

impacto negativo en la agricultura y la producción de cultivos, ya que la disponibilidad de agua es esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Por lo tanto, la gestión adecuada del riego y la selección de cultivos resistentes a la sequía son estrategias importantes en suelos de textura gruesa con bajas capacidades de retención de agua para maximizar la cantidad de agua aprovechable (Sandoval *et al.*, 2012) y minimizar los efectos negativos de la sequía en la agricultura.

La desertificación producida por la sequía y las lluvias poco constantes, provoca pérdida de suelos fértiles productivos, disminución de la producción agrícola. La asociación entre sequía y erosión del suelo es bastante compleja. La acción de la escorrentía y del viento agrava la tasa de erosión del suelo en las zonas propensas a la sequía. Además, la desecación del suelo crea grietas que reducen la humedad y el volumen del suelo. La sequía produce desertificación, suelos salinos y la degradación de la estructura del suelo (Saha *et al.*, 2020a). Según Aitken *et al.* (2016), la sobreexplotación de los recursos hídricos, particularmente en las zonas rurales, ha provocado un desequilibrio significativo entre la disponibilidad y el consumo de agua. Esta situación se ve agravada por la sequía continua que afecta a las regiones de Ñuble y Biobío.

Para mitigar estos efectos, se han propuesto soluciones basadas en técnicas de manejo de suelo y conservación del agua. Entre ellas destacan la incorporación de Biochar, Agricultura de Conservación, Mulching e Hidrogeles Superabsorbentes.

El biocarbón (Biochar) es un producto de la pirolisis de materia orgánica que se puede agregar al suelo para mejorar su capacidad de retención de agua, fertilidad y

estructura. Esto es esencial para la producción sostenible de alimentos y la preservación de los servicios ecosistémicos del suelo. Los estudios sugieren que el biocarbón de mayor superficie, como la cáscara de nuez, aumenta la capacidad de campo de suelos arenosos, pero no tiene un efecto en suelos con mayor contenido de arcilla. La aplicación de biocarbón no afecta el punto de marchitez en ninguno de los suelos estudiados. Los investigadores utilizaron imágenes de neutrones para explorar cómo el biocarbón retiene agua en el suelo y descubrieron que el agua retenida en los poros internos del biocarbón se libera gradualmente al suelo circundante, lo que mejora la retención de agua. En resumen, el uso de biocarbón puede tener un impacto limitado en la retención de agua en suelos con baja capacidad de almacenamiento de agua, pero usando dosis altas de biocarbón con poros grandes pueden mejorar la resiliencia del suelo durante eventos hidrológicos extremos (Wang *et al.*, 2019).

La agricultura de conservación es un enfoque holístico que utiliza prácticas como la labranza mínima o cero, la cobertura vegetal y la rotación de cultivos para mejorar la retención de agua en el suelo (CHS) y disminuir la erosión. Las prácticas de la agricultura de conservación (AC) incluyen la mínima alteración mecánica, la diversificación de los cultivos y la retención de residuos de cultivos con mantillo del suelo. Estas prácticas pueden aumentar el carbono orgánico del suelo (CO) y alterar la distribución del tamaño de los poros, lo que puede mejorar el agua aprovechable por la planta (AWC) (Abdallah *et al.*, 2021). Sin embargo, el CO secuestrado debido a la adopción de la AC no aumenta significativamente la AWC del suelo, ya que se limita a los 5 a 10 cm superiores del suelo, lo que limita su capacidad para aumentar el AWC en todo el perfil. A pesar de estas limitaciones, las prácticas de la AC tienen un efecto

positivo en el ahorro y la disponibilidad del agua debido al aumento de la infiltración de agua y la reducción de la evaporación de la superficie del suelo debido al acolchado de los residuos de cultivos. Para obtener los beneficios del CO y la AWC del suelo, es necesario considerar todo el perfil del suelo, no solo la capa superior (Abdallah *et al.*, 2021). Las prácticas de manejo basadas en la AC tienen un efecto limitado en la capacidad de retención de agua, pero cuando mejoran la materia orgánica del suelo, la estructura del suelo, la porosidad y la tasa de infiltración aumentan, lo que a su vez reduce la evaporación y aumenta el contenido de agua. Por el contrario, cambios ambientales que disminuyen la materia orgánica reducirán la capacidad de retención de agua disponible, lo que tendrá consecuencias adversas para la sostenibilidad de la productividad agrícola (Abdallah *et al.*, 2021).

El mulching es una técnica que implica cubrir la superficie del suelo con materiales orgánicos o inorgánicos para reducir la evaporación y conservar la humedad del suelo. Puede incluir el uso de materiales como paja, hojas, mantillo de corteza de árbol, plástico u otros. Un estudio comparó los efectos de diferentes tipos de acolchado (grava redonda, astillas de madera y césped de manila) en el suelo y el crecimiento de las plantas de *Osmanthus fragrans* L. "Rixianggui". Se encontró que el acolchado con grava redonda y astillas de madera aumentó significativamente la humedad del suelo en ambas profundidades. Además, mejoró la materia orgánica y el nitrógeno disponible, lo que beneficia el crecimiento de las plantas al aumentar la actividad de las raíces, el azúcar soluble y el contenido de clorofila A. La altura de la planta y el diámetro del tronco aumentaron notoriamente con grava redonda y astillas de madera. Sin embargo, el césped de manila no mejoró el crecimiento y podría competir con las

plantas por agua y nutrientes disponibles en el suelo. Por lo tanto, el estudio sugiere que la grava redonda y las astillas de madera son una mejor opción para el cultivo de *Osmanthus fragrans* L. "Rixianggui" en viveros y plantaciones. Se requieren más investigaciones para comprender mejor los efectos de la calidad del acolchado y el grosor de la capa de acolchado en el crecimiento de brotes y raíces (Xue Ni *et al.*, 2016).

El uso de los hidrogeles en la agricultura presenta un creciente interés, ya que permite una mejor eficiencia en el uso del agua y nutrientes en los cultivos. Los hidrogeles son polímeros hidrofílicos que absorben agua sin disolverse debido a su naturaleza entrecruzada. Cuando la absorción de agua supera 100 veces su peso o más, se denominan polímeros superabsorbentes (SAP) (Zohuriaan-Mehr y Kabiri, 2008). Actualmente, existen SAP capaces de absorber hasta 1000 g de agua por gramo de hidrogel seco (Ullah *et al.*, 2015) y los hidrogeles superabsorbentes comercialmente disponibles poseen una capacidad de absorción entre 100 y 500 g g⁻¹ (Saha *et al.*, 2020a). Los hidrogeles al ser sistemas abiertos también pueden alojar compuestos químicos que actúen como nutrientes. En términos simples, durante el tiempo de lluvia o riego, los hidrogeles absorben y retienen una gran cantidad de agua actuando como un reservorio adicional de agua. A medida que el suelo se seca durante el período de sequía, el agua absorbida en SAP se libera al suelo, proporcionando agua que las raíces de las plantas pueden absorber. El hidrogel también retiene el agua de drenaje y, por lo tanto, reduce la frecuencia de riego, lo que ahorra agua durante el período de sequía (Saha *et al.*, 2020a).

Como resultado se reduce el estrés hídrico en las plantas, generando mayor crecimiento (Abobatta, 2018). Entre las principales ventajas que presenta el uso de hidrogeles en la agricultura se encuentra una mayor retención de la humedad en el suelo, mejor aireación, reducción del consumo de agua, eficiencia en el uso de fertilizantes, reducción de la degradación del suelo, y reducción de la contaminación ambiental innecesaria ligada a las pérdidas de fertilizante por lixiviación. Como consecuencia, se presenta además una mejora en la estructura del suelo, y aumento en la producción de cultivos, promoviéndose de este modo el desarrollo de la agricultura.

Los hidrogeles se pueden clasificar como naturales y sintéticos, de acuerdo a la fuente de origen. Entre los polímeros naturales más comunes se encuentran los basados en quitosano, celulosa, colágeno, alginato, y almidón (Klein y Poverenov, 2020). Por su parte, los polímeros sintéticos más utilizados son los basados en ácido poliacrílico, poliacrilamida, acetato de polivinilo, y alcohol polivinílico. Las principales ventajas que presentan los polímeros naturales son su biodegradabilidad, biocompatibilidad, y no toxicidad. Esta biodegradabilidad se debe a que cuando se encuentran dispuestos en entornos bioactivos son degradados por la acción enzimática de microorganismos como bacterias, hongos y algas. Pero además sus cadenas poliméricas también pueden romperse mediante procesos no enzimáticos como la hidrólisis química, en consecuencia, son muy respetuosos con el medio ambiente (Sannino *et al.*, 2005). Por su parte, los hidrogeles sintéticos se caracterizan por presentar altas tasas de absorción ($>400 \text{ g g}^{-1}$ en agua destilada) (Michalik y Wandzik, 2020), disponibilidad de una amplia variedad de materias primas, y mayor vida útil debido a su baja

biodegradabilidad, lo que constituye su principal desventaja ya que generan contaminación ambiental (Chang *et al.*, 2020).

Los hidrogeles han demostrado ser eficientes en la retención de agua en los suelos, reduciendo el consumo del agua en el riego, mejorando las propiedades fisicoquímicas del suelo, estabilizando la producción agrícola y reduciendo el efecto de estrés por sequía (Shankarappa *et al.*, 2020). La mayoría de estudios publicados de hidrogeles superabsorbentes para aplicaciones en la agroindustria implican el uso de polímeros sintéticos como el poli (ácido acrílico), poli (acrilamida), y poli (acrilato de potasio). La principal razón para el uso de polímeros sintéticos son las altas capacidades de absorción alcanzadas. Además, los hidrogeles sintéticos destacan por su alta durabilidad, mayor resistencia mecánica, y menor costo (Behera y Mahanwar, 2020). Cheng *et al.* 2018, enfocados en la síntesis de hidrogeles sintéticos y su aplicación en la agricultura, han demostrado que polímeros de ácido acrílico pueden alcanzar capacidades de absorción de alrededor de 909 g g⁻¹ y son capaces de liberar controladamente urea como fertilizante. Se ha informado que otros hidrogeles sintéticos, como la poliacrilamida, el poliacrilato de potasio y una mezcla de poliacrilamida/poliacrilato de potasio (25/75), han mostrado capacidades de adsorción de aproximadamente 300, 700 y 1800 g g⁻¹, respectivamente (El-Rehim *et al.*, 2004). Además, la aplicación de estos hidrogeles en suelos arenosos han reportado duplicar el tiempo de vida en plantas de maíz antes de marchitarse por ausencia de agua (El-Rehim *et al.*, 2004).

Alghamdi *et al.* (2024) mencionaron que los suelos arenosos se caracterizan por tener un menor contenido de arcilla, materia orgánica y retención de nutrientes, con un pH y

una infiltración más altos. En cuanto a sus propiedades físicas, los suelos arenosos tienen una baja capacidad de retención de humedad, baja estabilidad de agregados y una alta tasa de infiltración. Los suelos arenosos se caracterizan por contener más del 70% de arena, lo que les otorga una baja capacidad para retener agua y nutrientes (Holanda *et al.*, 2023). Esto se debe a su estructura física, compuesta por partículas grandes que dejan espacios amplios entre ellas, permitiendo una rápida infiltración de agua y una retención mínima de humedad. A diferencia de los suelos arcillosos o limosos, los suelos arenosos tienen una baja capacidad de intercambio catiónico y una menor agregación de partículas, lo que contribuye a una menor estabilidad y un aumento en la pérdida de agua por filtración y evaporación. Este tipo de suelo es más susceptible a la erosión y degradación, lo que hace que la producción agrícola sea un desafío sin el uso de enmiendas orgánicas y técnicas de manejo adecuadas para mejorar la retención de agua y nutrientes (Holanda *et al.*, 2023).

Tomadoni *et al.* (2019) demostraron que, aunque los hidrogeles sintéticos son eficientes en la conservación de la humedad del suelo, tienen baja degradabilidad y se consideran posibles contaminantes del suelo, lo cual limita su uso futuro en la agricultura. Debido a la creciente conciencia y preocupación de la sociedad por la producción y el desarrollo agrícola sostenibles, el uso de hidrogeles sintéticos en aplicaciones agroindustriales no constituye una solución sostenible ni respetuosa con el medio ambiente en el uso agrícola, con efectos adversos sobre el medio ambiente. Por lo tanto, es necesario encontrar nuevas alternativas basadas en biopolímeros que no solo sean sostenibles, sino también competitivas en términos de precio, absorción y propiedades mecánicas.

En este contexto, el objetivo principal de este estudio es evaluar el efecto de un hidrogel superabsorbente natural (TG) en 4 concentraciones diferentes (0.3, 0.5, 0.8 y 1.0%) sobre la capacidad de retención de agua de tres suelos de textura gruesa (arenoso, areno francoso y franco arenoso) y un suelo de textura media (franco limoso). Los resultados se comparan con un hidrogel superabsorbente comercial existente (COM) y consideran la evaluación de la curva de retención de agua del suelo, la capacidad de agua disponible (AWC) y el tiempo requerido para alcanzar el punto de marchitez permanente (PMP).

2. Hipótesis

Al agregar un hidrogel de origen natural a suelos con mayor porcentaje de arena, en una concentración de 0.5%, estos aumentan la capacidad de retención de humedad en al menos un 50%. Además, si se aumenta o disminuye la dosis de aplicación, el agua aprovechable por la planta también aumenta o disminuye proporcionalmente.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

- Evaluar el efecto de un hidrogel superabsorbente natural en 4 concentraciones diferentes sobre la capacidad de retención de humedad en 3 suelos de textura gruesa y un suelo de textura media.

3.2. Objetivos específicos

- Evaluar y comparar el comportamiento de la curva de humedad para diferentes concentraciones de hidrogel de origen natural y otro comercial en 3 suelos de textura gruesa y un suelo de textura media.
- Comparar la agregación de superabsorbente en el aumento de la humedad aprovechable en diferentes suelos de textura gruesa.
- Cuantificar el tiempo que se demora el suelo en llegar a punto de marchitez permanente (PMP) para diferentes suelos de textura gruesa y distintas concentraciones.

4. Materiales y métodos

4.1. Suelos

Se seleccionaron tres suelos de textura gruesa y uno de textura media con condiciones adecuadas para el crecimiento de plantas de cuatro ubicaciones diferentes de la Región de Ñuble, Chile (Figura 1). Las muestras de suelo fueron extraídas a una profundidad de 10 cm desde la superficie del suelo. El suelo arenoso (A) y arenoso franco (AF) fueron recolectados de la zona de Quillón (Provincia de Itata). El suelo franco arenoso (FA) se obtuvo cerca del río Ñuble (San Carlos, Provincia de Punilla) y el suelo franco limoso (FL) del sector de San Pedro de Lillahue (San Nicolás, Provincia de Punilla). Las muestras disturbadas se extrajeron a una profundidad de 10 cm desde la superficie del suelo para cada textura y todas las muestras fueron de al menos 20 kg.

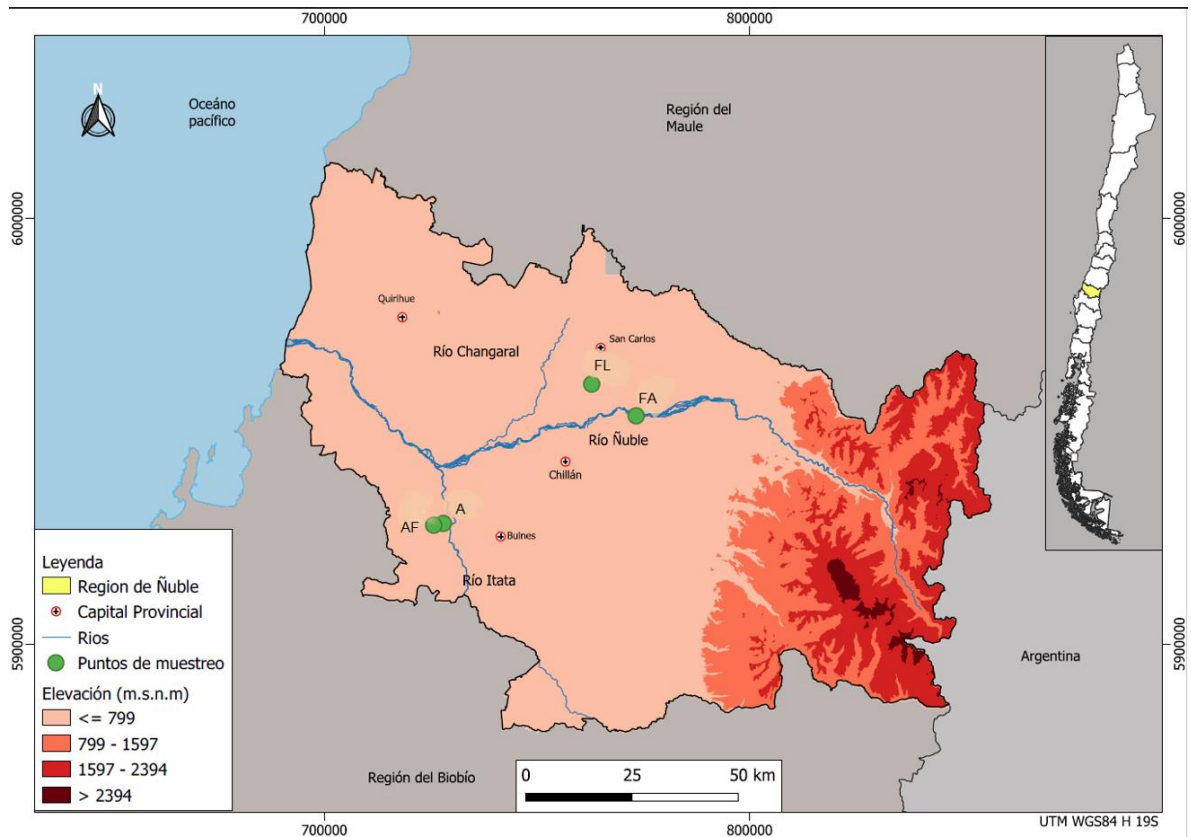


Figura 1. Ubicaciones de los puntos de muestreo de los cuatro suelos (A, AF, FA y FL) en estudio. Fuente: Elaboración propia

4.1.1. Granulometría

Los suelos se tamizaron de acuerdo con la norma ASTM D2487 (ASTM, 2011), considerando para el presente estudio las partículas más finas de 2 mm. El método de tamizado utilizó un agitador mecánico (modelo HES BK-TS200, Jinan, China) con tamices de 2, 1, 0.5, 0.25, 0.1 y 0.05 mm (Figura 2). Los tamices se colocaron en el agitador mecánico en orden decreciente (2, 1, 0.5, 0.25, 0.1 y 0.05 mm) y se colocaron 100 g de suelo en el primer tamiz. Luego, después de 10 minutos, cada tamiz fue pesado y se obtuvo el porcentaje de suelo en cada tamiz (Tabla 1).



Figura 2. Agitador mecánico con tamices de diferentes medidas. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1. Propiedades físicas para los suelos en estudio. Fuente: Elaboración propia.

Designación		Propiedades físicas			
		A	AF	FA	FL
Densidad aparente (g cm ⁻³)		1.48	1.29	1.26	1.35
Arena (%)	2.0-1.0 mm	33.71	0.54	14.32	3.02
	1.0-0.5 mm	34.18	4.22	16.62	2.65
	0.5-0.25 mm	15.69	24.69	14.68	3.83
	0.25-0.10 mm	6.05	44.85	11.50	9.19
	0.10-0.05 mm	0.87	8.40	5.48	4.71
Limo (%)	0.05-0.002 mm	2.1	9	17.9	52.3
Arcilla (%)	<0.002 mm	7.4	8.3	19.5	24.3
Clasificación USDA		Arenoso	Areno francoso	Franco arenoso	Franco limoso



Figura 3. Olla a presión y platos de succión. Fuente: Elaboración propia.

3.2. Polímeros superabsorbentes

Se compararon dos polímeros superabsorbentes (SAP): TG y COM. TG es un hidrogel superabsorbente compuesto, biodegradable y de bajo costo, diseñado para la retención de agua en suelos agrícolas y forestales. Está formulado con materiales completamente biodegradables y tiene como objetivo mejorar la capacidad de retención de agua en los suelos, promoviendo así un uso más eficiente de los recursos hídricos en la agricultura, suministrado por la Universidad de Concepción, Chile. TG está compuesto de carboximetilcelulosa y almidón, y cuenta con dos agentes entrecruzantes: ácido tánico (TA) y ácido cítrico (CA). TG tiene un tamaño promedio de partícula de 0.25 mm, junto con una capacidad promedio de absorción de agua de 160 gramos de agua por gramo de hidrogel.

COM es un SAP disponible comercialmente y ha sido ampliamente utilizado en la agricultura y la horticultura debido a que no es tóxico para las plantas. COM tiene un

tamaño promedio de partícula de 2 mm. Estos dos SAP se mezclarán con las cuatro texturas de suelo (Tabla 1) en concentraciones de 0.3%, 0.5%, 0.8% y 1.0%.

4.3. Obtención de la curva de retención de humedad de suelo mediante el método de la olla a presión

El método de la cámara de presión (Extractor de Placas de Presión CAT #1600, Santa Barbara, California, EE. UU.) (ASTM, 2011) considera cuatro placas cerámicas de succión de 100, 300, 500 y 1500 kPa (Figura 3). En cada placa, se depositaron tres muestras de 100 g de suelo disturbado con cuatro concentraciones de hidrogel (0.3%, 0.5%, 0.8% y 1.0%). Estas muestras se colocaron en pequeños cilindros de PVC de volumen conocido y, antes de colocar los cilindros con las muestras dentro de la cámara, las placas cerámicas se saturaron, asegurando un buen contacto entre el suelo (muestra) y la placa cerámica. Posteriormente, cada placa se colocó dentro de la cámara de presión. Una vez logrado esto, la cámara de presión se selló con pernos, y se aplicó una presión elegida mediante un compresor para alcanzar el equilibrio (el equilibrio se alcanza cuando no sale más agua por la tubería de salida de la cámara de presión). El tiempo de equilibrio para succión baja, por ejemplo, 33 kPa, se alcanzó después de 24 horas; sin embargo, para alcanzar una succión de 1500 kPa se tardó aproximadamente 4 días. Después de esto, cada una de las muestras se pesó para obtener el "peso húmedo" y se colocaron en un horno de secado durante 24 horas a una temperatura de 105°C. Luego, las muestras se volvieron a pesar para obtener el "peso del suelo seco". Así, el contenido de humedad gravimétrica se calculó utilizando la Ecuación 1.

$$\theta_g = \frac{P_{sh} - P_{ss}}{P_{ss}} \quad (1)$$

Donde, θ_g es el contenido de humedad gravimétrico (gr gr^{-1}), P_{sh} es el peso de suelo húmedo (gr) y P_{ss} es el peso del suelo seco (gr).

Luego al tener las masas secas y volumen de cada sub-muestra, se puede obtener la densidad aparente (D_{apar}) utilizando la Ecuación 2:

$$D_{ap} = \frac{P_{ss}}{V_s} \quad (2)$$

Donde, D_{ap} es la densidad aparente (gr cm^{-3}), P_{ss} es la masa de suelo seco (gr), y V_s es el volumen de suelo seco (cm^3)

Como se tiene la densidad aparente y el contenido de humedad gravimétrico se puede obtener el contenido de humedad volumétrico (θ_v) de cada sub-muestra de suelo, de la siguiente forma:

Dado D_a y θ_g , fue posible calcular el contenido de humedad volumétrica (θ_v) de cada muestra de suelo (Ecuación 3):

$$\theta_v = \theta_g * D_{apar} \quad (3)$$

4.4. Humedad aprovechable (AWC, siglas en inglés)

AWC representa la cantidad de agua en el suelo que las plantas pueden absorber y utilizar para su crecimiento. Se define como la diferencia entre la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP). CC es la cantidad de agua que el suelo puede retener después del exceso de agua gravitacional ha drenado y la tasa de drenaje vertical ha disminuido sustancialmente (Veihmeyer y Hendrickson, 1931). La capacidad de campo de cada muestra se determinó en una cámara de presión aplicando una succión de 10 kPa para suelos de textura gruesa y 33 kPa para el suelo franco limoso (textura media). Las muestras se mantuvieron en la cámara hasta alcanzar el equilibrio hidráulico. Esto generalmente ocurre durante las primeras 24 horas y dentro de 2-3 días después del riego o de lluvias intensas en suelos de textura gruesa y suelos de textura media, respectivamente. PMP es el nivel de humedad del suelo en el cual las plantas ya no pueden extraer agua, lo que provoca que se marchiten y, si se prolonga, puede llevar a la muerte de la planta. Este punto varía dependiendo del tiempo de planta y las condiciones del suelo. AWC se calcula de la siguiente manera:

$$AWC = CC - PMP \quad (4)$$

donde, AWC es la humedad aprovechable ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), CC es la capacidad de campo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), y PMP es el punto de marchitez permanente ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$).

4.5. Tiempo requerido para alcanzar PMP

Para medir y comparar el tiempo requerido para alcanzar el PMP (punto de marchitez permanente), el potencial hídrico del suelo se midió con un sensor de potencial hídrico del suelo (TEROS21, METER Group Inc., Pullman, WA, EE. UU.) (METER, 2019a). Todas las técnicas utilizadas para medir el potencial hídrico del suelo miden la energía potencial del agua en equilibrio con el agua en el suelo. Cuando un objeto entra en contacto hidráulico con el suelo, el potencial hídrico del objeto entra en equilibrio con el potencial del agua en el suelo. El sensor TEROS21 utiliza una matriz sólida (disco de cerámica porosa) para medir el potencial hídrico del suelo midiendo específicamente la permitividad dieléctrica.

La permitividad dieléctrica del aire, la cerámica y el agua son conocidas, por lo que la permitividad del disco de cerámica depende en gran medida de la cantidad de agua presente en los espacios porosos. Según el fabricante, el sensor tiene un rango operativo de -9 kPa (cerca de la saturación) a -105 kPa (suelo casi seco). Además, se utilizó un tensiómetro (TEROS31, METER Group Inc., Pullman, WA, EE. UU.) (METER, 2019b) capaz de medir desde 100 kPa (presión o nivel de agua) hasta -85 kPa (succión). El agua en el suelo y el agua en el tensiómetro están en contacto a través de una cerámica porosa y permeable al agua con una superficie activa de solo 0.5 cm² y un diámetro de 5 mm, lo que resulta en baja perturbación del suelo y una respuesta rápida. El sensor TEROS31 se utilizó junto con un barómetro (BarovueTM10, Campbell Scientific Inc., Logan, UT, EE. UU.) (Campbell, 2019a).

El TEROS31 mide valores de potencial matricial más potencial atmosférico, por lo tanto, al tener un barómetro, se puede encontrar con precisión el valor del potencial matricial. El contenido volumétrico de agua de los suelos (θ) se midió utilizando un sensor de capacitancia dieléctrica (TEROS12, METER Group Inc., Pullman, WA, EE. UU.) (METER, 2019c). El sensor utiliza un campo electromagnético para medir la permitividad dieléctrica del suelo utilizando una forma de onda de 70 MHz, que se carga de acuerdo con la constante dieléctrica del material. El tiempo de carga es proporcional a la constante dieléctrica del sustrato y su contenido volumétrico de agua. El sensor tiene un rango operativo de 0-0.7 m³ m⁻³. También tiene un termistor en la varilla central para medir la temperatura de -40 a 60°C.

Para este método, se colocó y compactó una mezcla de 2000 g de suelo y el hidrogel correspondiente en un cilindro con una altura de 15 cm y un diámetro de 20 cm (Figura 4). Dentro de cada cilindro, los sensores TEROS12, TEROS21 y TEROS31 se colocaron al mismo nivel para eliminar cualquier influencia de la variabilidad espacial (a una profundidad de 14 cm). Para acelerar el proceso de secado, las muestras se secaron dentro de un horno (modelo 05015-60, Cole-Parmer Instrument Company, Niles, Illinois, EE. UU.) a una temperatura de 40°C hasta que se superó el PMP (1500 kPa o 15 bar). Todos los sensores se conectaron a un registrador de datos (CR1000X, Campbell Scientific Inc., Logan, UT, EE. UU.) (Campbell, 2019b). Los datos de estos sensores se recolectaron cada minuto.

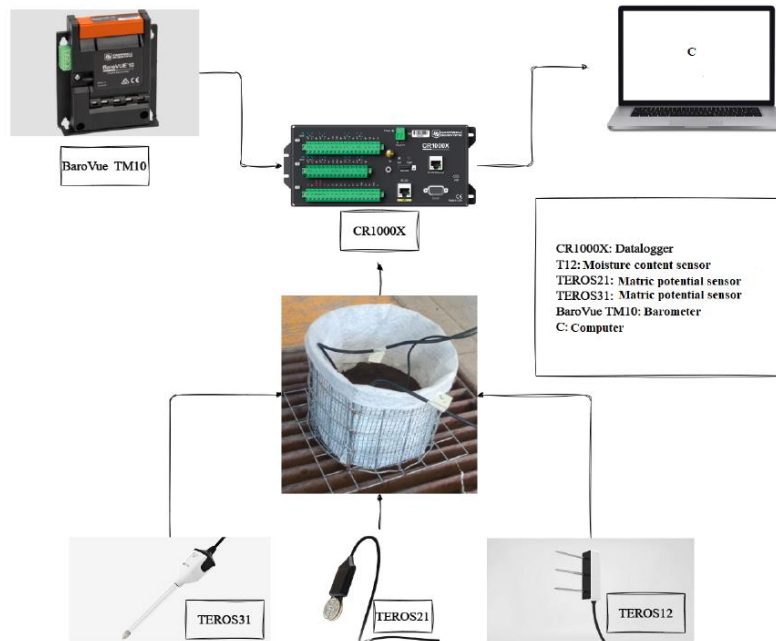


Figura 4. Diagrama de sensores de humedad y potencial mátrico. Fuente: Elaboración propia.

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para evaluar y comparar estadísticamente los efectos de diferentes concentraciones de hidrogel (TG y COM) en la humedad aprovechable (AWC) y el tiempo para alcanzar el punto de marchitez permanente (PMP). Los valores de humedad se obtuvieron con 3 réplicas, y se aplicó la prueba de Tukey con un nivel de significancia de $p < 0.05$ para identificar diferencias significativas entre los grupos.

5. Resultados y discusión

5.1. Curva de retención de humedad

La retención de agua en el suelo se puede definir en términos de la curva de retención de humedad del suelo. En general, esta curva representa la variación de la succión del

suelo (o potencial hídrico negativo) con el contenido de agua en el suelo (Saha *et al.*, 2020a). Los efectos de diferentes concentraciones de TG en la curva de retención de humedad para los cuatro suelos seleccionados se muestran en la Figura 4. Se observó que al agregar cualquier concentración de TG en el suelo arenoso, hay un aumento en la humedad del suelo a diferentes succiones. En general, un aumento en la concentración de TG en el suelo arenoso produce un incremento proporcional en la humedad del suelo a diferentes tensiones, excepto para una concentración del 0.8%. En el caso del suelo areno francoso, hubo un aumento en la curva de retención de humedad con la adición de la concentración de TG. Las curvas de retención de humedad para las concentraciones de 0.5, 0.8 y 1.0% fueron casi idénticas; sin embargo, la última concentración tuvo valores más altos. Esto puede significar que un aumento en la concentración de TG no predispone a un aumento proporcional en la curva de retención de humedad. Los suelos franco arenoso y franco limoso tuvieron el mismo efecto cuando se agregó TG, excepto por los valores de humedad del último suelo, que fueron ligeramente más altos que los del suelo franco arenoso. En el caso del suelo franco limoso, no hubo un aumento en la humedad, incluso se encontraron valores más bajos que en la curva de retención de humedad de los suelos sin concentración de hidrogel. Esto se debe a que estos suelos contienen un porcentaje más alto de arcilla, lo que significa que su tamaño de poro es más pequeño y el hidrogel no puede penetrar en ellos, lo que haría que el hidrogel rodee el perímetro de cada partícula de suelo, llevando a una disminución en la retención de agua. Además, el uso de un polímero hidrofílico no puede aumentar notablemente la retención de humedad en suelos franco arenosos o franco limosos en el régimen de succión alta

debido a la fuerza repulsiva entre las partículas de arcilla presentes en el suelo y las partículas de hidrogel (Saha *et al.*, 2020b).

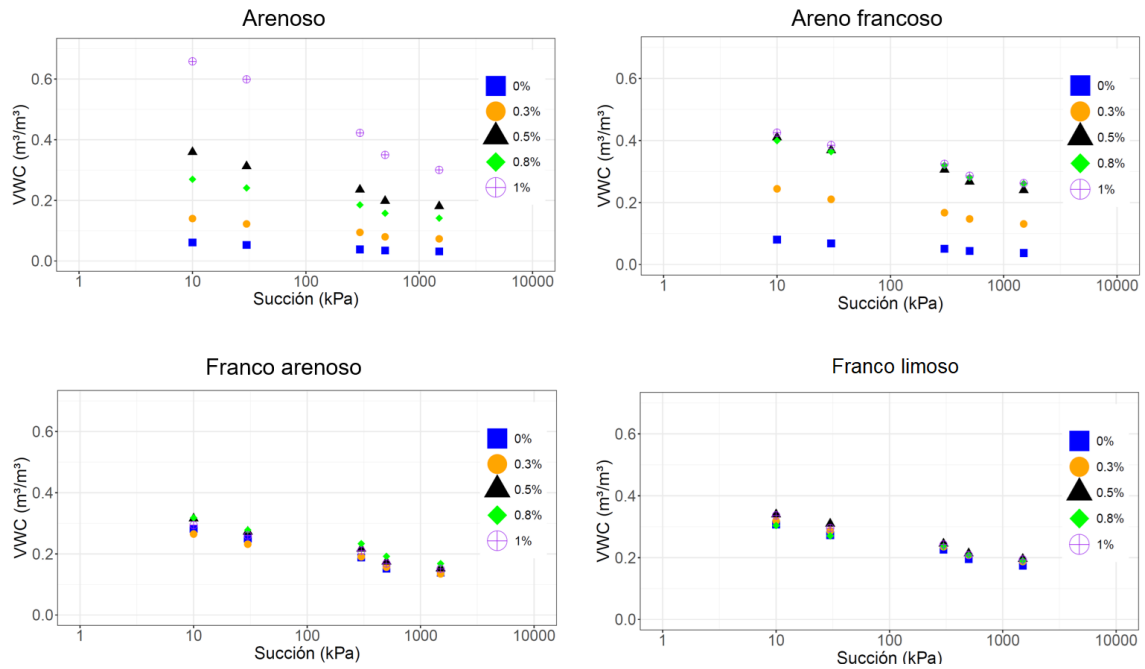


Figura 5. Mediciones de la curva de retención de humedad de los suelos en estudio con diferentes concentraciones de TG. Fuente: Elaboración propia.

En el suelo arenoso, hubo una relación proporcional entre la humedad y el aumento de las concentraciones de COM (Figura 6), sin embargo, al comparar COM con el hidrogel TG, este último tuvo un efecto mayor que el COM. En el caso del suelo franco arenoso, la adición de 0.3% de COM resultó en valores más altos en la curva de retención, lo que significa que es aconsejable utilizar esta concentración de COM en suelos arena francoso. El suelo franco arenoso mostró una mejor respuesta en comparación con la adición de TG para una concentración de 1.0% de COM. Por otro lado, el suelo franco limoso no mostró efecto en el aumento de la curva de retención de humedad para ninguna concentración de COM.

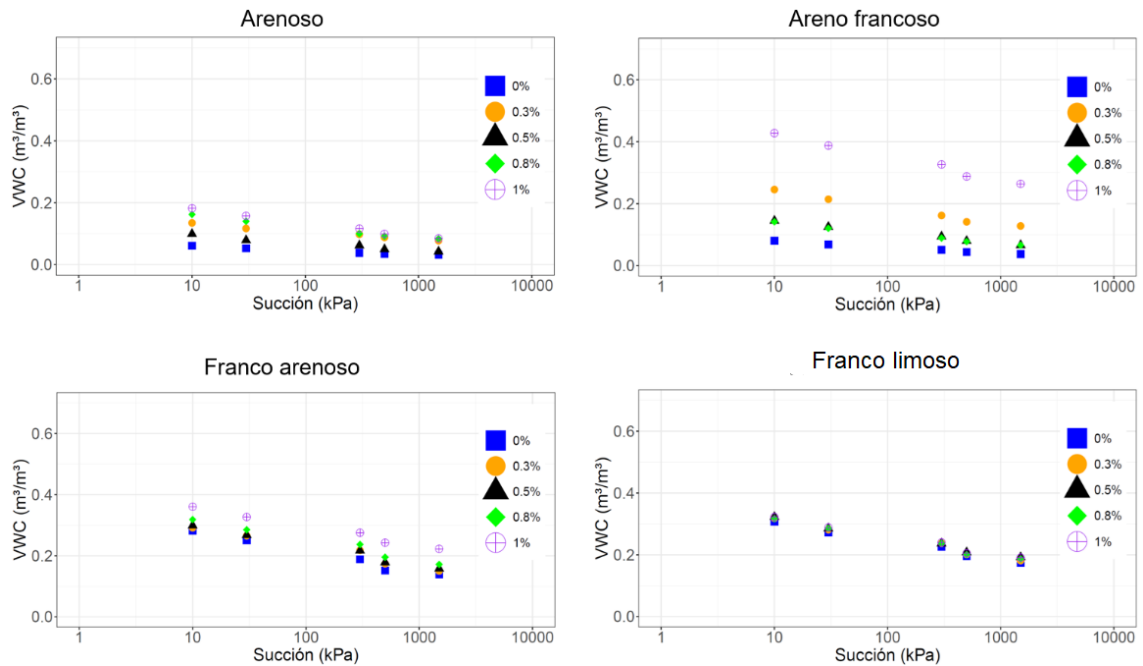


Figura 6. Mediciones de la curva de retención de humedad de los suelos en estudio con diferentes concentraciones de COM. Fuente: Elaboración propia.

Al comparar las diferentes concentraciones de hidrogel TG, encontramos que en el caso de la ausencia de concentración, los valores de humedad correspondientes a la curva de retención de humedad del suelo franco limoso son más altos que en los otros suelos (Figura 7). Para una concentración de 0.3% de TG, el suelo franco limoso también tuvo los valores de humedad más altos cuando se añadió TG. En el caso de una concentración de 0.5% y 0.8%, se observó un aumento en la curva de retención para el suelo franco arenoso (FA), mientras que el suelo arenoso tuvo los valores más bajos de la curva de retención de humedad. En el caso de una concentración de 1.0% de TG, el suelo arenoso (A) tuvo el mayor efecto positivo en comparación con los otros suelos, mientras que el suelo franco arenoso (FA) tuvo el menor efecto en el aumento de la humedad. Para una concentración de 0.5% y 0.8% de TG se observó que el

suelo con el mayor efecto positivo fue el suelo franco arenoso. Los suelos con una mayor concentración de arena se benefician del hidrogel TG. Según algunos autores (Saha *et al.*, 2020a; Dorraji *et al.*, 2010; Narjary *et al.*, 2012), a mayor concentración de hidrogel en un suelo de textura gruesa, mayor serán los valores de la curva de retención de humedad.

Se observó que existe un patrón definido entre las curvas de retención de humedad cuando se añadió COM en las diferentes concentraciones, siendo los suelos franco arenoso y franco limoso los que presentan mayores valores de humedad en comparación con los suelos franco arenoso y arenoso (Figura 8). Para una concentración del 1.0% de COM, la curva de retención de humedad del suelo franco arenoso tuvo valores de humedad más altos que el suelo franco limoso, debido a que el suelo franco limoso tiene partículas más pequeñas, lo que genera poros más pequeños y, por lo tanto, el hidrogel no puede entrar en los poros.

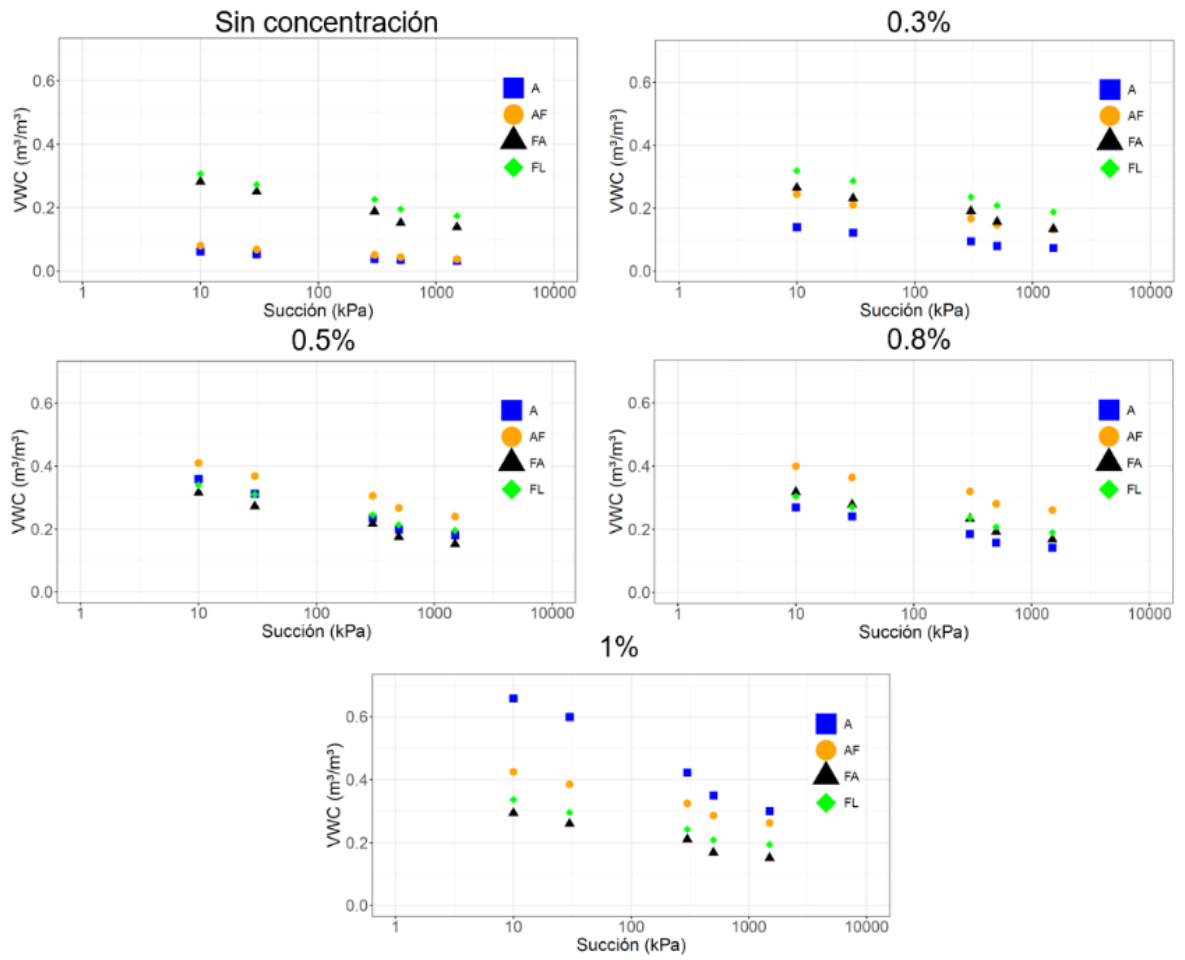


Figura 7. Comparación de la curva de retención de humedad de diferentes texturas de suelo para cuatro concentraciones de TG. Fuente: Elaboración propia.

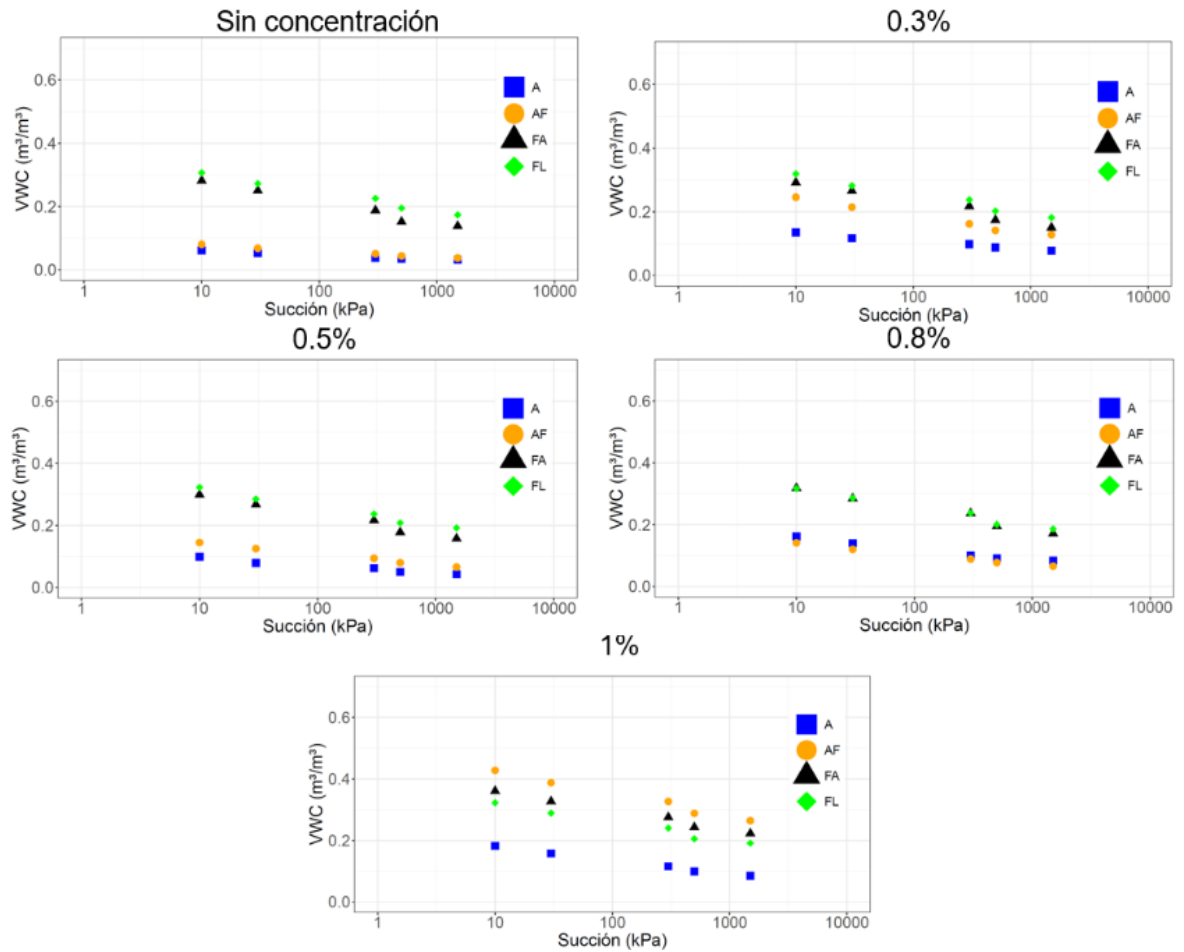


Figura 8. Comparación de la curva de retención de humedad de diferentes texturas de suelo para cuatro concentraciones de COM. Fuente: Elaboración propia.

5.2. Humedad aprovechable (AWC)

Para aplicaciones agronómicas y condiciones de estrés hídrico, uno de los parámetros importantes es cuantificar la cantidad de agua retenida en los poros del suelo que puede ser utilizada por las plantas. Por lo tanto, es deseable estimar la cantidad de hidrogel necesaria para aumentar el humedad aprovechable (AWC) en diferentes texturas de suelo (Saha *et al.*, 2020a). En general, la AWC se cuantifica como la diferencia entre la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente

(PMP). La cantidad de agua retenida en los poros del suelo después de que se ha drenado el exceso de agua gravitacional, y la tasa de drenaje vertical ha disminuido sustancialmente, se conoce como CC (Veihmeyer y Hendrickson, 1931). El agua retenida en poros del suelo menores de 0.2-0.5 μm , equivalente a una succión de matriz mayor de 1500 kPa, no puede ser extraída por las raíces de la mayoría de las plantas (Fullen y Catt, 2004). El contenido de agua correspondiente a 1500 kPa se conoce como PMP porque la planta se marchita permanentemente más allá de esta succión y no se recupera incluso después del riego.

Los valores más altos de CC y PMP se encontraron para el suelo arenoso con una concentración del 1.0% de TG (Figura 9). Este suelo mostró una relación proporcional entre el aumento de los valores de CC y PMP y el incremento en la agregación del hidrogel TG; sin embargo, para una concentración del 0.8% de hidrogel, los valores de CC y PMP fueron más bajos que en el caso de una concentración del 0.5%. En el caso del suelo franco arenoso, se observó un aumento en CC y PMP para la concentración de 0.3%; sin embargo, para las concentraciones del 0.5%, 0.8% y 1.0%, se encontraron valores muy similares en CC y PMP.

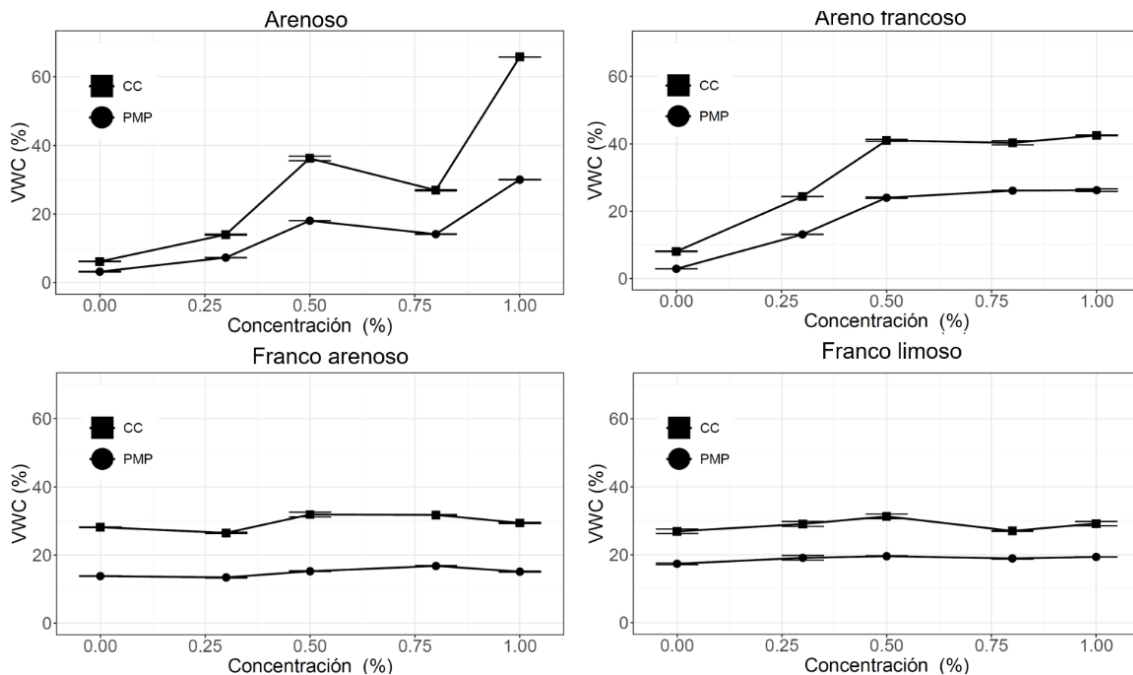


Figura 9. Capacidad de Campo (CC) y Punto de Marchitez Permanente (PMP) de los suelos en estudio con diferentes concentraciones de TG. Fuente: Elaboración propia.

En los suelos franco arenoso y franco limoso, no hubo diferencias significativas en los valores de CC y PMP cuando se añadieron diferentes concentraciones de TG. Se sabe que la retención de humedad a baja succión está dominada principalmente por el agua de los poros capilares, que a su vez depende de las partículas del suelo y del diámetro de los poros. Con la adición del hidrogel, los espacios vacíos en el suelo son ocupados por el polímero y el agua es absorbida por él. Para el suelo arenoso, la mejora se puede visualizar en todo el rango de la curva de retención de humedad, mientras que en los suelos franco arenoso y franco limoso, la mejora en la curva de retención de humedad fue mínima más allá de 100 kPa. Saha *et al.*, 2020a sostuvo que la presencia de un hidrogel superabsorbente altera la microestructura de los poros del suelo

(reducción de macroporos y mesoporos), lo que afecta predominantemente la retención de humedad a baja succión matricial (Narjary *et al.*, 2012).

Para el suelo arenoso, el mejor efecto en los valores de CC y PMP se obtuvo al añadir una concentración de 1.0% de COM, mientras que para una concentración de 0.5%, los valores de CC y PMP fueron muy similares a los observados para el suelo arenoso sin concentración (Figura 9). En el caso del suelo arenoso franco, se observó que a una concentración de 0.3% se obtuvo el mejor efecto en el aumento de los valores de CC y PMP, mientras que a concentraciones más altas de COM, los valores de CC y PMP disminuyeron y se mantuvieron constantes desde una concentración de 0.5% hasta 1.0%. En el caso del suelo franco arenoso, hubo un aumento directamente proporcional entre los valores de CC y PMP y la concentración de COM. Finalmente, en el suelo franco limoso, se observó que no hubo efecto en CC y PMP para las diferentes concentraciones de COM.

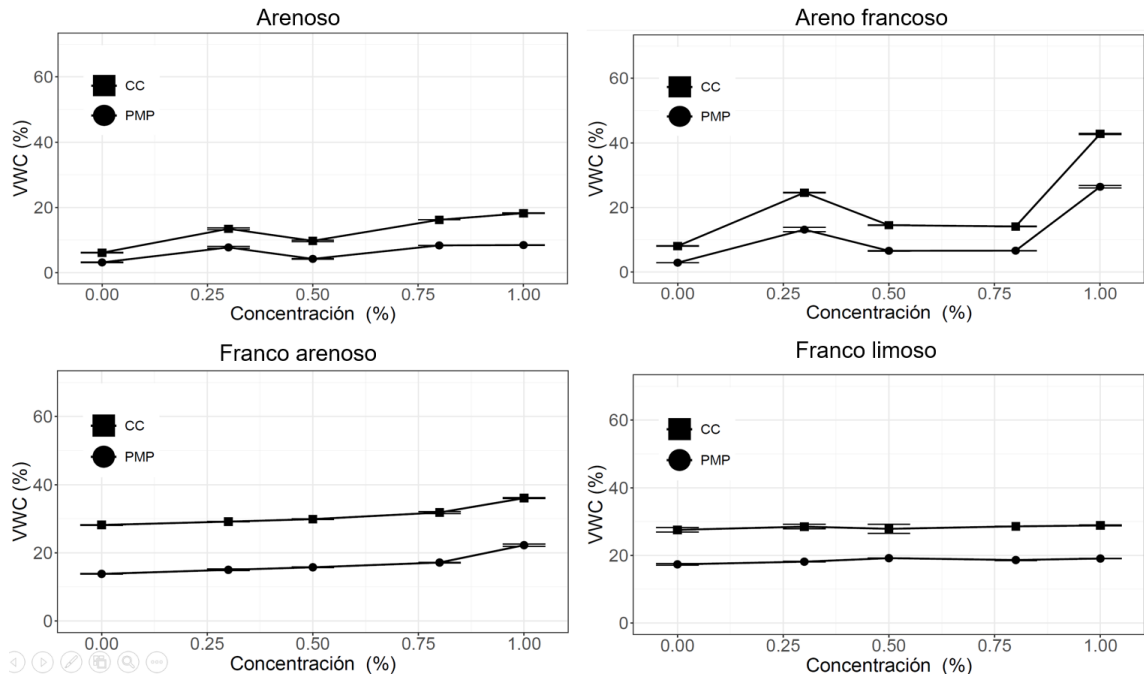


Figura 10. Capacidad de Campo (CC) y Punto de Marchitez Permanente (PMP) de los suelos en estudio con diferentes concentraciones de COM. Fuente: Elaboración propia.

Cuando comparamos el agua disponible obtenida mediante el uso de TG o COM para las diferentes texturas de suelo, se encontró que en el caso del suelo arenoso, al añadir una concentración del 1.0% de TG, el valor más alto de AWC, esto representa un incremento de un 26% más de AWC en comparación con el superabsorbente comercial (diferencia estadísticamente significativa, p -valor <0.05) se obtuvo el valor más alto de AWC (Figura 11); además, para todas las concentraciones, TG siempre obtuvo valores de AWC más altos y existe una relación proporcional en el aumento de AWC al incrementar la concentración de hidrogel. El suelo arenoso con una concentración de 0.5% de hidrogel TG mostró un 17.8% de AWC (aumento del 503.8% en base al suelo arenoso sin concentración), mientras que para una concentración del 1.0% de este hidrogel se obtuvo un valor de 35.8% de AWC (diferencia

estadísticamente significativa, $p\text{-valor}<0.05$). En el caso del suelo areno francoso, no hubo diferencia estadísticamente significativa en el valor de AWC entre la adición de TG y COM a una concentración de 0.3%, sin embargo, para concentraciones de 0.5%, 0.8% y 1.0%, TG tuvo valores más altos que COM. En el caso del suelo areno francoso con una concentración de 0.3% de TG, se observó que la AWC es menor (diferencia estadísticamente significativa, $p\text{-valor}<0.05$) en comparación con el suelo sin concentración y que la adición de COM resulta en el mismo valor de AWC. Para una concentración de 0.5% de TG, se obtuvo un valor más alto que al usar COM en la misma concentración. Por otro lado, las concentraciones de 0.8% y 1.0% tuvieron los mismos valores que el suelo franco arenoso sin ninguna concentración de COM o TG. Finalmente, en el caso del suelo franco limoso, se encontró que para las concentraciones de 0.3% y 1.0%, la AWC tenía el mismo valor que el suelo franco limoso sin ninguna concentración de TG o COM (no hay diferencias significativas).

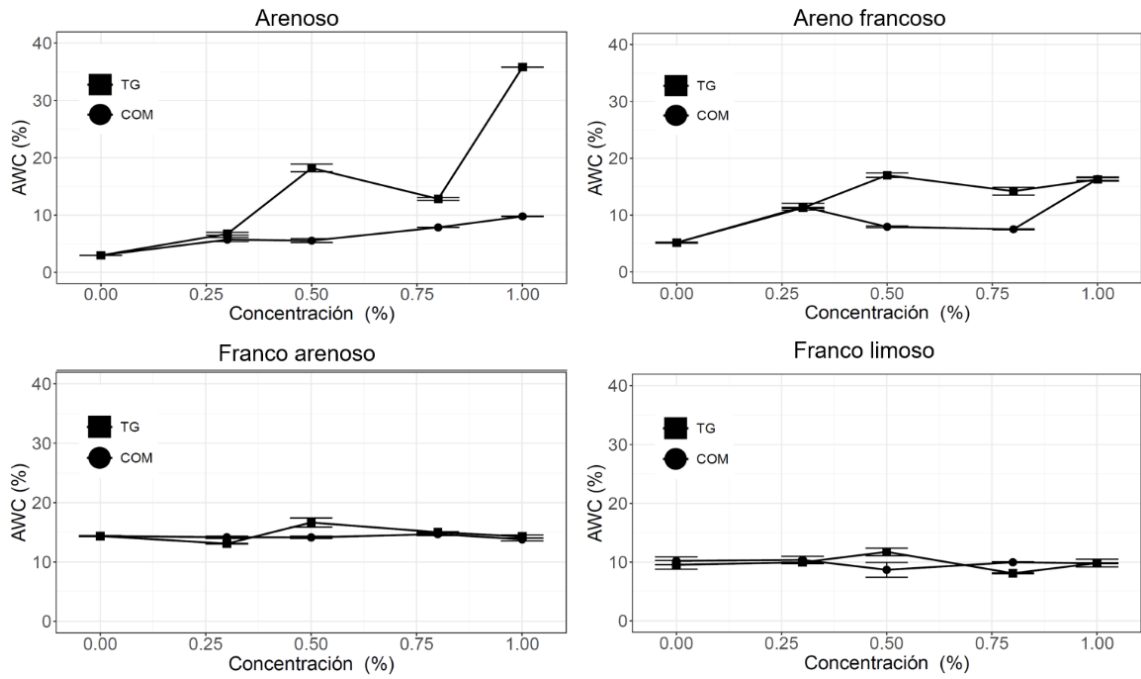


Figura 11. Comparación de TG y COM en la humedad aprovechable (AWC) para suelos en estudio con diferentes concentraciones. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Humedad aprovechable (%) para diferentes concentraciones de hidrogel en todos los suelos bajo estudio.

		AWC (%)			
Concentración		A	AF	FA	FL
TG	0	2.96 ^{a,A}	5.15 ^{a,B}	14.36 ^{a,C}	9.53 ^{a,D}
	0.3	6.69 ^{b,A}	11.32 ^{b,B}	13.03 ^{b,C}	9.94 ^{a,D}
	0.5	17.87 ^{c,A}	17.01 ^{c,B}	16.31 ^{c,C}	11.73 ^{b,D}
	0.8	12.82 ^{d,A}	13.86 ^{d,B}	15.00 ^{d,C}	8.09 ^{c,D}
	1	35.81 ^{e,A}	16.27 ^{e,B}	14.28 ^{a,C}	9.83 ^{a,D}
COM	0.3	5.71 ^{f,A}	11.76 ^{b,B}	14.15 ^{a,C}	10.03 ^{a,D}
	0.5	5.67 ^{f,A}	7.90 ^{f,B}	14.13 ^{a,C}	9.34 ^{a,D}
	0.8	7.84 ^{g,A}	7.53 ^{g,B}	14.69 ^{d,C}	9.96 ^{a,D}
	1	9.74 ^{h,A}	16.37 ^{e,B}	13.80 ^{a,C}	9.78 ^{a,A}

Nota: Letras minúsculas y mayúsculas diferentes indican diferencias significativas (valor $p < 0.05$) dentro de cada columna y fila, respectivamente.

5.3. Tiempo requerido para alcanzar punto de marchitez

El tiempo requerido para alcanzar el PMP (Abedi-Koupai et al., 2008) se determinó a partir de la respuesta de la succión matricial frente al tiempo (medido con TEROS21) durante el secado continuo. Generalmente, el tiempo necesario para alcanzar el PMP se denomina como el tiempo para alcanzar el punto de marchitez permanente de la planta bajo condiciones de estrés hídrico, ya que las raíces de la planta no pueden extraer agua más allá de este punto. Guiwei *et al.*, 2008 reportó que la adición de polímeros superabsorbentes al suelo redujo el número de riegos, prolongó la duración de la evaporación del agua y los síntomas de marchitez. Estos valores se obtuvieron en función del tiempo que tomó a los suelos sin ninguna concentración de hidrogel alcanzar el punto de marchitez permanente. En este estudio, para comparar el tiempo necesario para alcanzar el PMP utilizamos el término Fracción de Tiempo, definido como la relación entre el tiempo necesario para que un suelo alcance el PMP con una

determinada concentración de hidrogel y el tiempo necesario para el mismo suelo sin hidrogel.

En el caso del uso de TG, la concentración de 0.5% benefició al suelo areno francoso (Figura 12), tomando 3 veces más tiempo que el necesario para el suelo sin concentración. En el caso de COM, el suelo arenoso duplicó el tiempo para alcanzar el PMP con una concentración de 1.0%. Para el suelo franco arenoso, la fracción de Tiempo para las concentraciones de 0.5% y 1.0% tiene los valores más altos en comparación con las otras concentraciones y texturas de suelo.

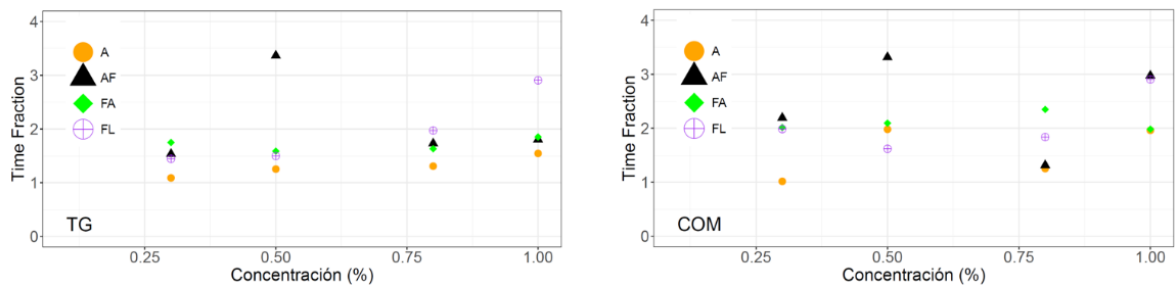


Figura 12. Fracción de tiempo usando TG y COM con diferentes concentraciones en suelos bajo estudio. Fuente: Elaboración propia.

Para el suelo arenoso, el tiempo para alcanzar el PMP aumentó proporcionalmente con el incremento de la concentración de TG. Al comparar el suelo arenoso sin concentración de hidrogel con una concentración de 1.0% de TG, hubo un aumento del 54.5% en el tiempo necesario para alcanzar el PMP (diferencia estadísticamente significativa, p -valor <0.05). En el caso del suelo areno francoso, se observó que el mayor aumento se obtuvo con una concentración de 0.5% de TG en comparación con las otras concentraciones. Al comparar la misma concentración con un suelo sin concentración de TG, el aumento en el tiempo para alcanzar el PMP es del 236.6%

(diferencia estadísticamente significativa, p -valor <0.05). Para las concentraciones de 0.3%, 0.8% y 1.0%, el tiempo para alcanzar el PMP fue muy similar, por lo tanto, es conveniente aplicar una concentración de 0.5% para aumentar el tiempo para alcanzar el PMP en suelo arenoso francoso. El suelo franco limoso mostró que el mayor aumento en el tiempo para alcanzar el PMP se obtuvo con una concentración de 1.0% de TG (una diferencia estadísticamente significativa de 85.3%). No hubo una gran diferencia para concentraciones de 0.5% y 0.8% de TG. El segundo mayor aumento se obtuvo con una concentración de 0.3% de TG, con un aumento del 75% (diferencia estadísticamente significativa, p -valor <0.05). En el caso del suelo franco limoso, se observó que hay un aumento proporcional del tiempo para alcanzar el PMP con el incremento de la concentración de TG ($R^2=0.89$). Al comparar los diferentes suelos en estudio, encontramos que el suelo franco limoso es el que aumenta su tiempo para alcanzar el PMP en mayor medida. Para los suelos arenoso y franco limoso, observamos un aumento en el tiempo para alcanzar el PMP proporcional a la concentración de TG. Para una concentración de 1.0% de TG se obtuvo un aumento del 242.27% en el tiempo para alcanzar el PMP (diferencia estadísticamente significativa, p -valor <0.05), utilizando suelo franco limoso. El-Asmar *et al.*, 2017 reportó un aumento del 50% en el tiempo en suelo franco limoso y Rattan *et al.*, 2022 mostró un aumento del 75% en el tiempo para alcanzar el PMP. Las concentraciones de 0.3% y 0.5% de TG mostraron valores de tiempo similares. Se observó que el suelo que más aumentó el tiempo para alcanzar el PMP fue el suelo franco limoso (Figura 13), mientras que el suelo arenoso fue el que obtuvo el menor aumento; sin embargo, el

suelo arenoso obtuvo el mayor incremento en AWC en comparación con los otros suelos.

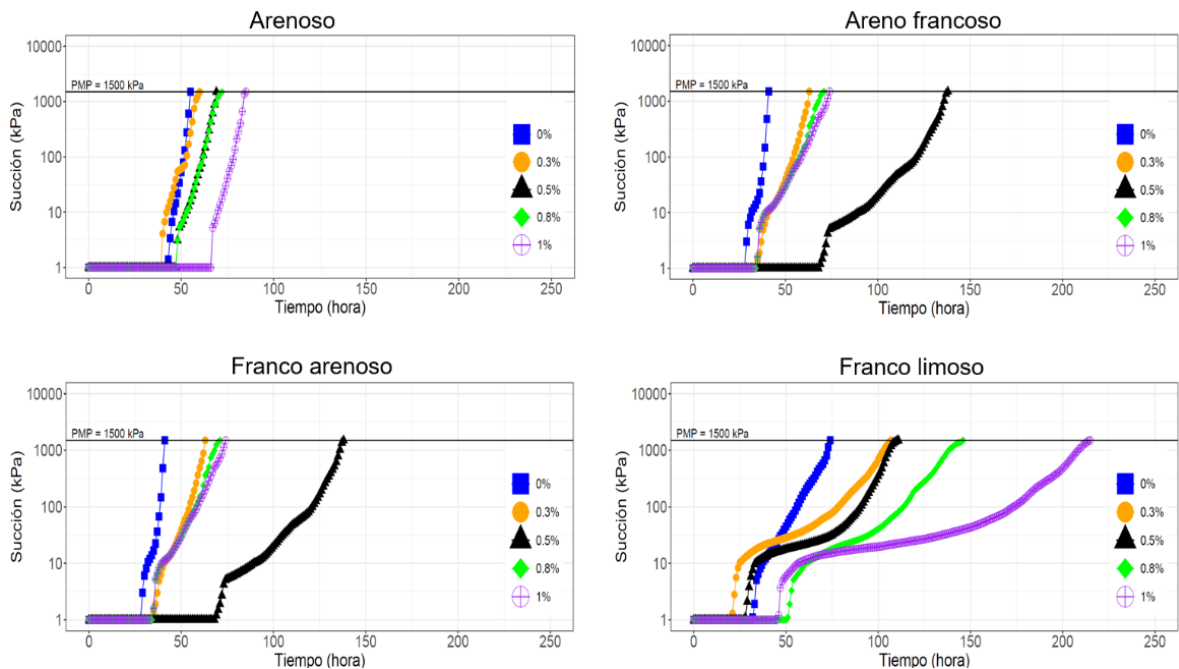


Figura 13. Variación de la succión con el tiempo para los suelos con diferentes concentraciones de TG. Fuente: Elaboración propia.

Incorporando el hidrogel COM, para el suelo arenoso se observó que para las concentraciones de 0.3% y 0.8% de COM hay un ligero aumento en el tiempo para alcanzar el PMP; sin embargo, para las concentraciones de 0.5% y 1.0% de COM se observó un aumento del 98.2% (diferencia estadísticamente significativa, p -valor <0.05) en el tiempo para alcanzar el PMP (Figura 14). El suelo areno francoso mostró el mayor aumento en el tiempo para alcanzar el PMP con una concentración de 0.5% de COM (aumento del 109.5%). En el caso del suelo franco arenoso, se observa que para una concentración de 0.8% hay un aumento del 134.9% en el tiempo para alcanzar el PMP (diferencia estadísticamente significativa, p -valor <0.05). Finalmente, en el caso de

la incorporación de COM en el suelo franco limoso, se observó que para una concentración de 1.0% se obtuvo el mayor aumento en el tiempo para alcanzar el PMP (aumento del 241.3%). Tanto en los hidrogeles TG como COM, se observó que una concentración de 1.0% tuvo un efecto positivo en el suelo franco limoso, ya que se obtuvieron los mayores aumentos en el tiempo para que el suelo alcanzara el PMP, superando las 200 horas. No hubo proporcionalidad entre el aumento de la concentración de COM y el tiempo para alcanzar el PMP. El mayor aumento en el tiempo para alcanzar el PMP se observó en el suelo franco limoso y el menor aumento se observó en el suelo arenoso. Al comparar los dos hidrogeles, se observó que el suelo limoso presenta un mejor comportamiento, ya que hay un aumento considerable en el tiempo para alcanzar el punto de marchitez permanente. Koupai *et al.*, 2008 indicó que el uso de hidrogeles incrementa la disponibilidad de agua y, por lo tanto, extiende el período de supervivencia de las plantas en comparación con suelos sin concentración de hidrogel. Rattan *et al.* (2023) reportaron que agregar un hidrogel al suelo arenoso y franco limoso reduce significativamente la necesidad de agua. Se han observado reducciones significativas en las necesidades de riego de muchas plantas debido al aumento en la capacidad de retención de agua de los suelos con la adición de hidrogeles (Taylor, 1986). Además, se menciona que una concentración necesita ser adicionalmente verificada en función de los rendimientos de cultivos observados en el campo para una amplia variedad de texturas de suelo antes de ser recomendada.

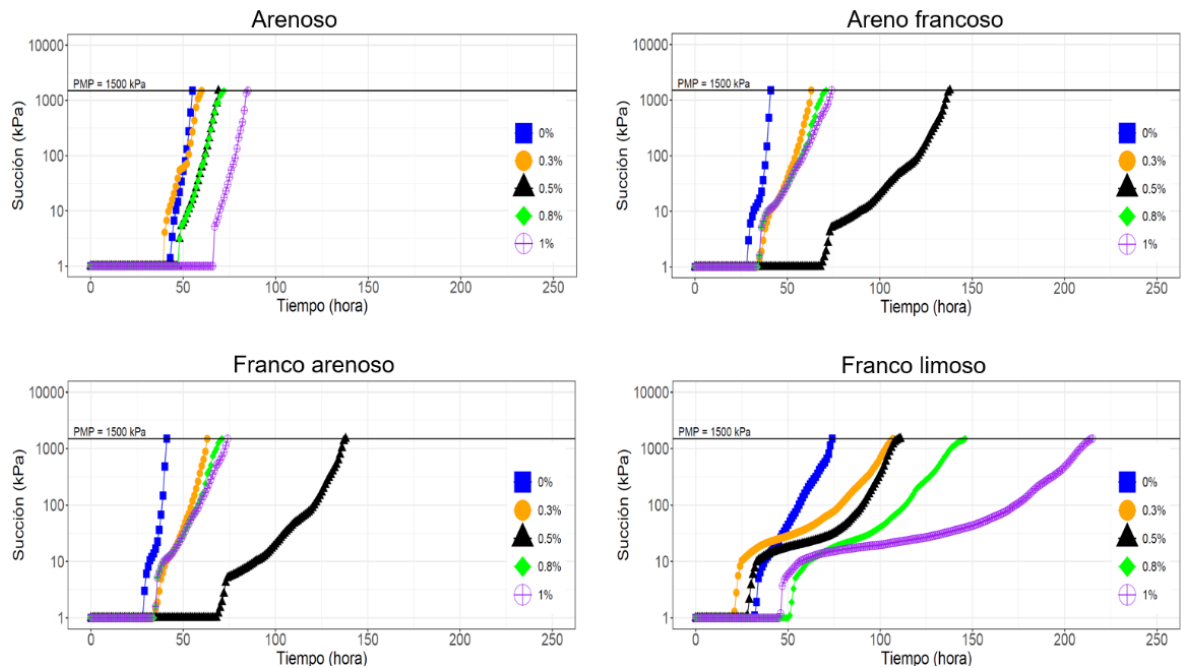


Figura 14. Variación de la succión con el tiempo para suelos con diferentes concentraciones de COM. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados indicaron claramente que la aplicación de hidrogel superabsorbente reduce la frecuencia de riego, lo que ahorra agua en condiciones de sequía. Esto restringe indirectamente la lixiviación excesiva de nutrientes por el flujo de agua subterránea. Sin embargo, este estudio se realizó en condiciones de laboratorio, y su aplicación en condiciones de campo necesita ser evaluada (Saha *et al.*, 2020a).

6. CONCLUSIÓN

Este estudio evaluó el efecto de un polímero superabsorbente natural (TG) en 4 diferentes concentraciones sobre la capacidad de retención de agua de cuatro suelos (Arenoso; Arena Francoso; Franco Arenoso y Franco Limoso). Específicamente, se analizó el impacto del hidrogel en la curva de retención de agua, el AWC (capacidad de agua disponible) y el tiempo requerido para que el suelo alcance el PMP (punto de

marchitez permanente). Los resultados se compararon con un polímero comercial existente (COM).

Se observó que agregar cualquier concentración de TG a los suelos arenoso y areno francoso resultó en un aumento en la curva de retención de agua, con los valores más altos registrados para una concentración de 1.0%. En el caso del suelo franco limoso, no hubo un cambio significativo en la curva de retención de agua para todas las concentraciones evaluadas. Para el COM, el hidrogel aumentó los valores de retención de agua para el suelo arenoso, areno francoso y franco arenoso. En general, los valores más altos se observaron para la concentración del 1.0%. Para el suelo franco limoso, no hubo cambios significativos. Al comparar ambos hidrogeles, el aumento en la curva de retención de agua para COM fue menor que para TG.

En el análisis del efecto sobre el AWC, los valores más altos de FC (capacidad de campo) se encontraron en el suelo arenoso con una concentración de 1.0%. En general, para el suelo arenoso y areno francoso, mayores concentraciones de TG resultaron en mayores valores de FC. En el caso de los suelos franco arenoso y franco limoso, no se observaron diferencias significativas en los valores de FC y PMP cuando se añadieron diferentes concentraciones de TG. Para el hidrogel COM en un suelo franco arenoso, el mayor aumento en los valores de FC y PMP se encontró en una concentración del 1.0%. Para las texturas franco arenoso y franco limoso, no hubo diferencias significativas en los valores de FC y PMP. Al comparar el AWC (FC - PMP), la adición de TG al suelo arenoso con una concentración del 1.0% mostró el mayor aumento en AWC con un valor de 35.8%, incluso superando al suelo franco limoso. Para el suelo franco limoso, no se observó ningún efecto en AWC con las diferentes

concentraciones de TG y COM. Para el suelo arenoso, en general, a mayor concentración de hidrogel, mayor es el valor de AWC. Se observaron valores más altos para TG en comparación con COM. Para TG, el AWC aumentó proporcionalmente, con valores de 17.8% y 35.8% para concentraciones de 0.5% y 1.0%, respectivamente. En el caso del suelo franco arenoso, también se observó un aumento en AWC con el aumento de la concentración de hidrogel, pero este aumento fue significativo solo hasta concentraciones del 0.5%. Más allá del 0.5%, no hubo aumentos considerables en los valores de AWC. Para este suelo, nuevamente, se observaron valores más altos para TG en comparación con COM. Al comparar el AWC de los diferentes suelos para todas las concentraciones estudiadas, TG tuvo un mejor efecto en el aumento de AWC. Los resultados muestran que no hay un aumento en AWC cuando se agrega un hidrogel superabsorbente a suelos de textura más fina (suelo franco limoso).

Al comparar el efecto de ambos hidrogeles en el tiempo requerido para alcanzar el PMP, los valores más altos se encontraron para el suelo franco limoso con una concentración del 1.0%. Para TG, en general, una mayor concentración de hidrogel resultó en un tiempo más prolongado para alcanzar el PMP. Sin embargo, los resultados para concentraciones intermedias (0.3 - 0.8%) no mostraron diferencias significativas. Para COM, no hubo una concentración que consistentemente resultara en tiempos más largos para alcanzar el PMP. La incorporación de COM generalmente aumentó el tiempo para alcanzar el PMP, pero los resultados no mostraron diferencias concluyentes para todas las texturas de suelo analizadas.

En general, el hidrogel TG mejora la capacidad de retención de agua en suelos de textura gruesa, con valores más altos en comparación con un hidrogel comercial. La

incorporación de este hidrogel en dichos suelos permitiría mayores cantidades de agua disponible para los cultivos durante sequías y eventos extremos de sequedad, reduciendo los efectos negativos y el estrés hídrico en las plantas. Este estudio demuestra el potencial del hidrogel TG, una alternativa natural y biodegradable a los hidrogeles sintéticos comúnmente utilizados en la agricultura. Mientras que los hidrogeles sintéticos son efectivos para retención de humedad, plantean riesgos ambientales debido a su baja biodegradabilidad y su potencial para causar contaminación a largo plazo. En contraste, el hidrogel TG, hecho de materiales como carboximetilcelulosa y almidón, mejora la retención de humedad en los suelos, siendo amigable con el medio ambiente. Esto lo convierte en una opción prometedora para la agricultura sostenible, ya que responde a la necesidad de soluciones que mantengan el equilibrio ecológico mientras mejoran la gestión del agua en el suelo.

Los hallazgos del estudio son especialmente valiosos para los agricultores en áreas con suelos de textura gruesa y regiones que enfrentan sequías o escasez de agua, particularmente en zonas semiáridas donde la retención de agua es crítica para la supervivencia de los cultivos. Sin embargo, para asegurar la aplicación generalizada del hidrogel TG, se necesitan más estudios de campo que evalúen su durabilidad a largo plazo y compatibilidad ambiental. Estas investigaciones futuras ayudarán a confirmar su efectividad y viabilidad económica, apoyando la implementación a gran escala del hidrogel en prácticas agrícolas sostenibles.

7. LITERATURA

- Abedi-Koupai, J., F. Sohrab & G. Swarbrick. (2008). Evaluation of Hydrogel Application on Soil Water Retention Characteristics. *Journal of Plant Nutrition*. 31(2), 317-331.
- Abdallah, R., Juaidi, A., Savaş, M. A., Çamur, H., Albatayneh, A., Abdala, S., & Manzano-Agugliaro, F. (2021). Retraction: Abdallah et al. A Critical Review on Recycling Composite Waste Using Pyrolysis for Sustainable Development. *Energies*, 15(20), 7645. <https://doi.org/10.3390/en15207645>.
- Abobatta, W. (2018). Impact of hydrogel polymer in agricultural sector. *Advances in Agricultural Environmental Sciences*, 1(2), 59-64. <https://doi.org/10.30881/aaeoa.00011>.
- Aitken, D.; Rivera, D.; Godoy-Faúndez, A.; Holzapfel, E. (2016). Water Scarcity and the Impact of the Mining and Agricultural Sectors in Chile. *Sustainability*, 8, 128. <https://doi.org/10.3390/476su8020128>.
- Alghamdi, A.G.; Majrashi, M.A.; Ibrahim, H.M. (2024). Improving the Physical Properties and Water Retention of Sandy Soils by the Synergistic Utilization of Natural Clay Deposits and Wheat Straw. *Sustainability*, 16, 46. <https://doi.org/10.3390/su16010046>.
- ASTM International. (2011). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM D2487-11. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

- Azeem, B., Ku Shaari, K. Z., Man, Z., Basit, A., & Trinh, T. (2014). Review on Materials Methods to Produce Controlled Release Coated Urea Fertilizer. *Journal of Controlled Release*, 181. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2014.02.020>.
- Behera, S., & Mahanwar, P. A. (2020). Superabsorbent polymers in agriculture and other applications: A review. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 59(4), 341-356. <https://doi.org/10.1080/25740881.2019.1647239>.
- Campbell Scientific Inc. (2019a). BaroVUE™10 Barometer. Logan, UT, USA: Campbell Scientific Inc.
- Campbell Scientific Inc. (2019b). CR1000X Measurement and Control Datalogger. Logan, UT, USA: Campbell Scientific Inc.
- Chang, L., Xu, L., Liu, Y., & Qiu, D. (2020). Superabsorbent polymers used for agricultural water retention. *Polymer Testing*, 94, 107021. <https://doi.org/10.1016/j.polymeresting.2020.107021>.
- Cheng, D., Liu, Y., Yang, G., & Zhang, A. (2018). Water- and Fertilizer-Integrated Hydrogel Derived from the Polymerization of Acrylic Acid and Urea as a Slow-Release N Fertilizer and Water Retention in Agriculture. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66, 5762–5769. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b00872>.
- Cipriano, B. H., Banik, S. J., Sharma, R., Rumore, D., Hwang, W., Briber, R. M., & Raghavan, S. R. (2014). Superabsorbent Hydrogels That Are Robust and Highly Stretchable. *Macromolecules*, 47, 4445–4452. <https://doi.org/10.1021/ma500882n>.

- Dorraji, S., Golchin, A., & Ahmadi, S. (2010). The Effects of Hydrophilic Polymer and Soil Salinity on Corn Growth in Sandy and Loamy Soils. *Clean-Soil Air Water*, 38. <https://doi.org/10.1002/clen.201000017>.
- El-Asmar, J., Jaafar, H., Bashour, I., Farran, M., & Saoud, I. (2017). Banding Improves Plant Growth, Survival, and Water Use Efficiency in Two Calcareous Soils. *Clean - Soil Air Water*, 45. <https://doi.org/10.1002/clen.201700251>.
- El Idrissi, A., Channab, B. E., Essamlali, Y., & Zahouily, M. (2024). Superabsorbent hydrogels based on natural polysaccharides: Classification, synthesis, physicochemical properties, and agronomic efficacy under abiotic stress conditions: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 258, 128909. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128909>.
- El-Rehim, H. A. A., Hegazy, E. S. A., & El-Mohdy, H. L. A. (2004). Radiation synthesis of hydrogels to enhance sandy soils water retention and increase plant performance. *Journal of Applied Polymer Science*, 93, 1360-1371. <https://doi.org/10.1002/app.20571>.
- Fullen, M., & Catt, J. (2004). *Soil Management: Problems and Solutions*. Routledge, London, UK.
- Guilherme, M. R., Aouada, F. A., Fajardo, A. R., Martins, A. F., Paulino, A. T., Davi, M. F., Rubira, A. F., & Muniz, E. C. (2015). Superabsorbent hydrogels based on polysaccharides for application in agriculture as soil conditioner and nutrient carrier:

A review. *European Polymer Journal*, 72, 365-385.
<https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2015.04.017>.

Guiwei, Q., d.V.A., & Cunha-Queda, C. (2008). Remediation of a mine soil with insoluble polyacrylate polymers enhances soil quality and plant growth. *Soil Use and Management*, 24, 350–356. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2008.00173.x>.

Holanda, S., Vargas, L. & Granada, C. (2023). Challenges for sustainable production in sandy soils: A review. *Environment, Development and Sustainability*.
<https://doi.org/10.1007/s10653768-023-03895-6>.

Klein, M., & Poverenov, E. (2020). Natural biopolymer-based hydrogels for use in food and agriculture. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100, 2337-2347.
<https://doi.org/10.1002/jsfa.10274>.

Koupai, J. A., Eslamian, S. S., & Kazemi, J. A. (2008). Enhancing the available water content in unsaturated soil zone using hydrogel, to improve plant growth indices. *Ecohydrology and Hydrobiology*, 8, 67-75. <https://doi.org/10.2478/v10104-009-0005-0>.

Malik, S., Chaudhary, K., Malik, A., Punia, H., Sewhag, M., Berkesia, N., Nagora, M., Kalia, S., Malik, K., Kumar, D., et al. (2023). Superabsorbent Polymers as a Soil Amendment for Increasing Agriculture Production with Reducing Water Losses under Water Stress Condition. *Polymers*, 15, 161.
<https://doi.org/10.3390/polym15010161>.

Marcomini, A., Ronco, P., Zennaro, F., Torresan, S., Critto, A., Santini, M., Trabucco, A., Zollo, A., & Galluccio, G. (2017). A risk assessment framework for irrigated agriculture under climate change. *Advances in Water Resources*, 110, 562-578. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.08.003>.

METER Group Inc. (2019a). Operator's manual, TEROS21. Pullman, WA: METER Group Inc.

METER Group Inc. (2019b). Operator's manual, TEROS31. Pullman, WA: METER Group Inc.

METER Group Inc. (2019c). TEROS12. Pullman, WA, USA: METER Group Inc.

Michalik, R., & Wandzik, I. (2020). A Mini-Review on Chitosan-Based Hydrogels with Potential for Sustainable Agricultural Applications. *Polymers*, 12. <https://doi.org/10.3390/polym12102425>.

Narjary, B., Aggarwal, P., Chikara, A., Chakraborty, D., & Singh, R. (2012). Water availability in different soils in relation to hydrogel application. *Geoderma*, 188. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.03.002>.

OCDE. (2016). Evaluaciones del desempeño ambiental. Recuperado el 10 de junio de 2023.

Rattan, B. Saha, A., Bordoloi, S., Garg, A., Sahoo, L. & Sekharran, S. (2022). Efficacy of novel water absorbing polymer amended soil for improving drought resilience of *Solanum lycopersicum*. *Soil Science Society of America Journal*. 87. 13–29. <https://doi.org/10.1002/saj2.20480>.

- Rattan, B.; Garg, A.; Sekharan, S.; Sahoo, L. (2023). Developing an environmental friendly approach for enhancing water retention with the amendment of water-absorbing polymer and fertilizers. *Central Asian Journal of Water Research*. 9. 113–129. <https://doi.org/10.29258/CAJWR/2023 598-R1.v9-1/113-129.eng>.
- Richards, L. A. (1948). Porous plate apparatus for measuring moisture retention and transmission by soil. *Soil Science*, 66, 105-110. <https://doi.org/10.1097/00010694-194808000-00003>.
- Saha, A., Rattan, B., Sekharan, S., & Manna, U. (2020a). Quantifying the interactive effect of water absorbing polymer (WAP)-soil texture on plant available water content and irrigation frequency. *Geoderma*, 368, 114310. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114310>.
- Saha, A., Sekharan, S., & Manna, U. (2020b). Superabsorbent hydrogel (SAH) as a soil amendment for drought management: A review. *Soil and Tillage Research*, 204, 104736. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104736>.
- Sandoval, E., Dorner, F., Seguel, O., y Rivera, D. (2012). Métodos de análisis físicos del suelo. Universidad de Concepción. Publicaciones Departamento de Suelos y Recursos Naturales, Chillán, Chile, 5, 80 p.
- Sannino, A., Pappadà, S., Madaghiele, M., Maffezzoli, A., Ambrosio, L., & Nicolais, L. (2005). Crosslinking of cellulose derivatives and hyaluronic acid with water-soluble carbodiimide. *Polymer*, 46, 11206-11212. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2005.10.048>.

- Shankarappa, S. K., Muniyandi, S. J., Chandrashekar, A. B., Singh, A. K., Nagabhushanaradhya, P., Shivashankar, B., El-Ansary, D. O., Wani, S. H., & Elansary, H. O. (2020). Standardizing the Hydrogel Application Rates and Foliar Nutrition for Enhancing Yield of Lentil (*Lens culinaris*). *Processes*, 8, 420. <https://doi.org/10.3390/pr8040420>.
- Tarasova, E. V., Mukha, I. P., Vlasova, E. N., Petrenko, A. E., & Antonenko, Y. N. (2022). Agricultural Applications of Superabsorbent Polymer Hydrogels. *International Journal of Molecular Sciences*, 23, 15134. <https://doi.org/10.3390/ijms232315134>.
- Taylor, K. C., & Halfacre, R. G. (1986). The effect of hydrophilic polymer on media water retention and nutrient availability to *Ligustrum lucidum*. *Horticultural Science*, 21, 1159-1161. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.21.5.1159>.
- Tomadoni, B., Casalongué, C., & Alvarez, V. (2019). Biopolymer-Based Hydrogels for Agriculture Applications: Swelling Behavior and Slow Release of Agrochemicals. In *Polymers for Agri-Food Applications*. 99-125. https://doi.org/10.1007/978-3-030-19416-1_7.
- Ullah, F., Othman, M. B. H., Javed, F., Ahmad, Z., & Akil, H. M. (2015). Classification, processing and application of hydrogels: A review. *Materials Science and Engineering C*, 57, 414-433.
- Veihmeyer, F. J., & Hendrickson, A. H. (1931). The Moisture Equivalent as a Measure of the Field Capacity of Soils. *Soil Science*, 32, 181-194.

- Wang, J., & Wang, S. (2019). Preparation, modification and environmental application of biochar: A review. *Journal of Cleaner Production*, 227, 1002-1022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.282>.
- Xue, N., Song, W., Zhang, H., Yang, X., & Wang, L. (2016). Effects of Mulching on Soil Properties and Growth of Tea Olive (*Osmanthus fragrans*). *PLOS ONE*, 11(8), e0158228. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158228>.
- Yang, Y., Wu, J., Zhao, S., Gao, C., Pan, X., Tang, D., & van der Ploeg, M. (2021). Effects of long-term superabsorbent polymer and organic manure on soil structure and organic carbon distribution in different soil layers. *Soil and Tillage Research*, 206. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104781>.
- Zohuriaan-Mehr, M. J., & Kabiri, K. (2008). Superabsorbent polymer materials: A review. *Iranian Polymer Journal (English Edition)*, 17(6), 451-477.