



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

PROGRAMA DE POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES

**POLIACRILATOS DE POTASIO COMO
RETENEDORES DE HUMEDAD Y MEDIO DE
FERTILIZACIÓN EN PLANTAS DE *Pinus*
cembroides subsp. *orizabensis***

FILIBERTO ROSAS LÓPEZ

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2019

CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALIAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACION

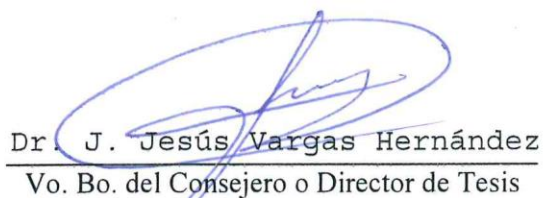
En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe ING. FILIBERTO ROSAS LÓPEZ, Alumno (a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor DR. J. JESÚS VARGAS HERNÁNDEZ, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis POLIACRILATOS DE POTASIO COMO RETENEDORES DE HUMEDAD Y MEDIO DE FERTILIZACIÓN EN PLANTAS DE Pinus cembroides subsp. orizabensis.

y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 11 de FEBRERO de 2019



Firma del
Alumno (a)



Dr. J. Jesús Vargas Hernández
Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

La presente tesis titulada: **POLIACRILATOS DE POTASIO COMO RETENEDORES DE AGUA Y MEDIO DE FERTILIZACIÓN EN PLANTAS DE *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis***, realizada por el alumno: **FILIBERTO ROSAS LÓPEZ**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



Dr. J. Jesús Vargas Hernández

ASESORA



Dra. Libia Iris Trejo Téllez

ASESORA



Dra. Francisca Otelia Plascencia Escalante

Montecillo, Texcoco, Estado de México, febrero de 2019

**POLIACRILATOS DE POTASIO COMO RETENEDORES DE HUMEDAD Y
MEDIO DE FERTILIZACIÓN EN PLANTAS
DE *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis***

Filiberto Rosas López, M. en C.

Colegio de Postgraduados, 2019

RESUMEN

Los poliacrilatos de potasio (hidrogeles) han tenido un uso importante en la agricultura, especialmente en zonas donde hay escasez de agua, como en el caso del hábitat del pino piñonero *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*. La investigación tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de poliacrilatos de potasio en el ahorro de agua y como medio de fertilización en la producción de planta de la especie en vivero, y sus efectos sobre la humedad del suelo y crecimiento de las plantas en campo. En vivero se combinó el hidrogel con dos tipos de fertilizante (hidrosoluble y de lenta liberación) en un diseño factorial 2 x 3. Se evaluó el consumo de agua, la tasa relativa de crecimiento (TRC) en diámetro y altura de la planta, así como la acumulación de biomasa y la concentración y contenido de N, P y K en los componentes de la planta (tallos, hojas, verdes, hojas secas y raíces). En campo se estudió el efecto del hidrogel y del fertilizante de lenta liberación en el contenido de humedad en el suelo, la fenología del brote terminal y las tasas de crecimiento en diámetro y altura de las plantas. En la fase de vivero, el uso de hidrogel redujo el consumo de agua de las plantas en un 16 %, y la TRC en altura en 35 %, pero sin afectar la TRC en diámetro ni la acumulación de biomasa. El fertilizante de lenta liberación aumentó el consumo de agua y redujo la TRC en diámetro y altura en 93 % y 57 %, respectivamente, así como la biomasa total (8 %) y la biomasa de raíces (15.4 %). Por otro lado, el fertilizante soluble aumentó la TRC en diámetro y altura en 43 % y 27 %, respectivamente, pero redujo la acumulación de biomasa del tallo

en 15.6 %. El hidrogel y el tipo de fertilizante afectaron de manera diferenciada la concentración y contenido de NPK en los componentes de la planta y en algunos casos se detectó un efecto antagónico o interferencia del hidrogel con el fertilizante de liberación controlada y un efecto sinérgico o neutro con el fertilizante soluble. En campo se encontró un efecto positivo del hidrogel en el contenido de humedad del suelo, en particular durante la época sin lluvias, en la brotación de la yema y en el crecimiento del brote terminal. También hubo un efecto favorable del fertilizante en la disponibilidad de humedad del suelo, el alargamiento del brote y la TRC en diámetro de las plantas. Se concluye que el uso de poliacrilatos de potasio en conjunto con fertilizante soluble puede ser una alternativa viable para la producción de plántula de *P. cembroides* subsp. *orizabensis* en vivero y con fertilizante de lenta liberación en campo. Para mayor eficiencia en la absorción de nutrimentos, usando hidrogel, se recomienda emplear fertilizante de lenta liberación para N y fertilizante hidrosoluble para P y K. Es recomendable continuar la evaluación en campo para determinar índices óptimos de fertilización y cantidad de hidrogel.

Palabras Clave: Hidrogel, *Pinus cembroides*, consumo de agua, crecimiento, vivero fenología vegetativa, producción de planta, reforestación.

POTASSIUM POLYACRYLATES AS MOISTURE RETAINERS AND AS A FERTILIZATION METHOD IN *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis* SEEDLINGS

Filiberto Rosas López, M. en C.

Colegio de Postgraduados, 2019

ABSTRACT

Potassium polyacrylates (hydrogel) have had an important use in agriculture, especially in areas where there is water shortage, as in the case of the *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis* habitat. The main aim of this research was to evaluate the efficiency of potassium polyacrylates in water saving, and as a fertilization method in seedling production of this species in nursery, and its effects on soil moisture and plant growth in the field. In the nursery, the hydrogel was combined with two types of fertilizer (slow release and water soluble) in a 2 x 3 factorial design. Water consumption, relative growth rate (RGR) in diameter and height, as well as biomass accumulation and nutrient concentration and content in seedling components were evaluated. In the field, the effect of hydrogel and slow release fertilizer on soil moisture content, phenology of terminal bud and growth rate of diameter and height of seedlings were evaluated. In the nursery, hydrogel reduced average water consumption by 16 % and RGR in height by 35 %, but without affecting RGR in diameter nor biomass accumulation. The slow-release fertilizer increased water use and reduced RGR in diameter and height by 93 % and 57 %, respectively, as well as total (8 %) and root (15.4 %) biomass. On the other hand, the water soluble fertilizer increased RGR in diameter and height, by 43 % and 27 %, respectively, but reduced stem biomass accumulation by 15.6 %. Hydrogel and fertilizer type affected differently NPK concentration and content in seedling components but an antagonist or interference effect of hydrogel with the slow-release fertilizers and a synergistic or neutral effect with the soluble fertilizer was detected. In the field, a positive

effect of the hydrogel was also found on soil moisture content, particularly during the dry season, on bud burst and on elongation of the terminal shoot. A favorable effect of the fertilizer on the availability of soil moisture, elongation of terminal shoot and RGR in diameter of seedlings. The use of potassium poly-acrylates combined with fertilizer could be a viable alternative for seedling production of *P. cembroides* subs. *orizabensis* both in the nursery and in the field. For more efficient use of fertilizer and hydrogel, it is recommended to use slow release fertilizer for N and water-soluble fertilizer for P and K. It is advisable to continue evaluating longer periods of time to determine optimum rates of fertilization and amount of hydrogel to be applied.

Keywords: Hydrogel, *Pinus cembroides*, water consumption, seedling growth, nursery, bud phenology, seedling production, reforestation.

DEDICATORIA

Dedicado a las personas que me apoyaron en todo momento y me motivaron a persistir para concluir con esta meta; porque en cada parte del proceso animaron con sus buenos deseos y siempre pusieron su apoyo. A Cruz; mi pareja y compañero, a mis padres, hermanos y amigos, a ustedes por creer en mí.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios por guiarme en cada etapa de mi vida, de las cuales he aprendido cada una de las lecciones para ser mejor. Por la vida misma y su protección.

Al Colegio de Postgraduados, al Campus Montecillo y sus instalaciones, por permitirme alcanzar una más de las metas que me he puesto en la vida.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la oportunidad de obtener el financiamiento durante este trayecto.

A mi consejo particular que guio y dio soporte en cada etapa de este proyecto de investigación; Dr. J. Jesús Vargas Hernández, Dra. Libia Iris Trejo Téllez y Dra. F. Ofelia Plascencia Escalante. Al Dr. René Valdez Lazalde por la revisión oportuna de este documento.

Gracias a la familia Córdoba Rodríguez por haber hecho posible la fase de campo incluida en esta investigación; su apoyo en todo momento y la amistad generada.

A todos mis amigos del Postgrado en Ciencias Forestales, especialmente a Luz María por su amistad y apoyo en todo momento, dos años de muchas experiencias.

CONTENIDO

RESUMEN.....	iv
ABSTRACT	vi
DEDICATORIA.....	viii
AGRADECIMIENTOS.....	viii
LISTA DE CUADROS	xi
LISTA DE FIGURAS	xii
INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
LITERATURA CITADA.....	3
OBJETIVOS.....	5
CAPÍTULO 1. EFECTO DEL HIDROGEL EN EL CONSUMO DE AGUA, CRECIMIENTO Y ABSORCIÓN DE NUTRIMENTOS EN PLANTAS DE <i>Pinus</i> <i>cebrooides</i> subsp. <i>orizabensis</i> , EN VIVERO.....	6
RESUMEN.....	6
ABSTRACT	8
INTRODUCCIÓN	10
MATERIALES Y MÉTODOS	11
Localización y condiciones del experimento.....	11
Diseño experimental y establecimiento del ensayo	12
Evaluación del consumo de agua.....	13
Medición del crecimiento y distribución de biomasa en las plantas.....	14
Evaluación de la concentración y contenido de N, P y K por órgano	14
Análisis estadístico	15
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	15
Consumo de agua.....	15
Crecimiento y acumulación de biomasa en <i>P. cerebrooides</i> subsp. <i>orizabensis</i>	19
CONCLUSIONES	39
LITERATURA CITADA.....	40
CAPÍTULO 2. EFECTO DE HIDROGEL (POLIACRILATOS DE POTASIO) Y FERTILIZANTE EN EL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL SUELO Y EL	

CRECIMIENTO DE PLANTAS DE <i>Pinus cembroides</i> subsp. <i>orizabensis</i> , EN CAMPO	44
RESUMEN.....	44
ABSTRACT	45
INTRODUCCIÓN	46
MATERIALES Y MÉTODOS	48
Ubicación y condiciones del ensayo de campo	48
Diseño experimental y establecimiento del experimento	49
Evaluación del contenido humedad en el suelo	50
Evaluación de la brotación de la yema y alargamiento del brote	51
Evaluación del crecimiento de las plantas	51
Análisis estadístico	52
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	52
Contenido de humedad del suelo	52
Brotación de la yema y crecimiento del brote terminal	58
Crecimiento en diámetro y altura.....	61
CONCLUSIONES	64
LITERATURA CITADA.....	64
CONCLUSIONES GENERALES	68

LISTA DE CUADROS

- Cuadro 1.** Resultados del análisis de varianza (valor de p) del efecto de los factores hidrogel y fertilizante sobre el consumo de agua en plantas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis* evaluado en diferentes periodos de medición. .. 16
- Cuadro 2.** Resultados del análisis de varianza (valor de p) del efecto de los factores hidrogel y fertilizante sobre la tasa relativa de crecimiento (TRC) en diámetro y altura, contenido de humedad (CH) y acumulación de biomasa en las plantas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*. 19
- Cuadro 3** Resultados del análisis de varianza (valor de p) del efecto de los factores hidrogel (H), fertilizante (F) y su interacción (H x F) en la concentración y contenido de los nutrimentos N, P y K en tallo, hojas verdes, hojas secas, raíz, y contenido total en plantas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*. 23
- Cuadro 4.** Resultados del análisis de varianza (valor de P) para el contenido de humedad del suelo (CH) por efecto de los factores hidrogel y fertilizante a diferentes distancias y en diferentes fechas de medición en una plantación de *Pinus cembroides* su subsp. *orizabensis*. 53
- Cuadro 5.** Resultados del análisis de varianza (valor de P) para las características de brotación de la yema y la longitud del brote terminal por efecto de los factores hidrogel (H) y fertilizante (F) en diferentes fechas de medición (FE) en una plantación de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*. 58
- Cuadro 6.** Resultados del análisis de varianza (valor de P) para las tasas relativas de crecimiento en diámetro (TRCD) y en altura (TRCA) por efecto de los factores hidrogel (H) y fertilizante (F) en plantas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*. 62

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Efecto de los factores hidrogel (a), fertilizante (b) y sus interacciones (c), así como del periodo de evaluación (d) sobre el consumo de agua promedio por día (mL d⁻¹) en plantas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*. H-, sin hidrogel; H+, con hidrogel; F0=sin fertilizante; F1=fertilizante hidrosoluble; F2=fertilizante de lenta liberación (Osmocote Plus®); 1, 2, 3, 4 y 5, periodos de evaluación. 17
- Figura 2.** Efecto de los factores hidrogel (a, c) y fertilizante (b y d), sobre la tasa relativas de crecimiento en diámetro (TRCD) y altura (TRCA) en plantas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*. H-, sin hidrogel; H+, con hidrogel; F0=sin fertilizante; F1= fertilizante hidrosoluble; F2=fertilizante de lenta liberación (Osmocote Plus®). 20
- Figura 3.** Efecto del hidrogel (a, c) y fertilizante (b, d) sobre el contenido de humedad (a, b) y la biomasa (c, d) de tallo (T), raíz (R), hojas (H) y total (TAL) en plantas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*. H-, sin hidrogel; H+, con hidrogel; F0=sin fertilizante; F1=fertilizante hidrosoluble; F2=fertilizante de lenta liberación (Osmocote Plus®)..... 21
- Figura 4.** Efecto del hidrogel (H) en la concentración y contenido de nitrógeno (N) en tallos (a, A), raíces (b, B), hojas verdes (c, C) y hojas secas (d, D) de plantas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*. H-=sin hidrogel; H+=con hidrogel.... 24
- Figura 5.** Efecto del factor hidrogel (H) en la concentración y contenido de fósforo (P) en tallos (a, A), raíces (b, B), hojas verdes (c, C) y hojas secas (d, D) de plantas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*. H-=sin hidrogel; H+=con hidrogel.... 26
- Figura 6.** Efecto del factor hidrogel (H) en la concentración y contenido de potasio (K) en tallos (a, A), raíces (b, B), hojas verdes (c, C) y hojas secas (d, D) de plantas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*. H-=sin hidrogel; H+=con hidrogel.... 28

- Figura 7.** Efecto del factor fertilizante (F) en la concentración y contenido de nitrógeno (N) en tallos (a, A), raíces (b, B), hojas verdes (c, C) y hojas secas (d, D) de plantas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*. F0=sin fertilizante; F1=fertilizante hidrosoluble; F2=fertilizante de lenta liberación (Osmocote Plus®)..... 30
- Figura 8.** Efecto del factor fertilizante (F) en la concentración y contenido de fósforo (P) en tallos (a, A), raíces (b, B), hojas verdes (c, C) y hojas secas (d, D) de plantas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*. F0=sin fertilizante; F1=fertilizante hidrosoluble; F2=fertilizante de lenta liberación (Osmocote Plus®). 32
- Figura 9.** Efecto del factor fertilizante (F) en la concentración y contenido de potasio (K) en tallos (a, A), raíces (b, B), hojas verdes (c, C) y hojas secas (d, D) de plantas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*. F0=sin fertilizante; F1=fertilizante hidrosoluble; F2=fertilizante de lenta liberación (Osmocote Plus®)..... 33
- Figura 10.** Efecto de la interacción del hidrogel (H) y del fertilizante (F) en la concentración y contenido de nitrógeno (N) en raíces (a, A) y hojas verdes (b, B) de plantas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*. H-=sin hidrogel; H+=con hidrogel; F0=sin fertilizante; F1=fertilizante hidrosoluble; F2=fertilizante de lenta liberación (Osmocote Plus®). 35
- Figura 11.** Efecto de la interacción del hidrogel (H) y del fertilizante (F) en la concentración y contenido de fósforo (P) en raíces (a, A), hojas verdes (b, B) y hojas secas (c) de plantas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*. H-=sin hidrogel; H+=con hidrogel; F0=sin fertilizante; F1=fertilizante hidrosoluble; F2=fertilizante de lenta liberación (Osmocote Plus®). 36
- Figura 12.** Efecto de la interacción del hidrogel (H) y del fertilizante (F) en la concentración y contenido de potasio (K) en raíces (a, A) de plantas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*. H-=sin hidrogel; H+=con hidrogel; F0=sin

fertilizante; F1=fertilizante hidrosoluble; F2=fertilizante de lenta liberación (Osmocote Plus®).	37
Figura 13. Efecto de la fuente de fertilización (a) y de la interacción del hidrogel (H) y el fertilizante (F) (b) en el contenido total de N de plantas de <i>Pinus cembroides</i> subsp. <i>orizabensis</i> . H-=sin hidrogel; H+=con hidrogel; F0=sin fertilizante; F1=fertilizante hidrosoluble; F2=fertilizante de lenta liberación (Osmocote Plus®).	37
Figura 14. Efecto de la fuente de fertilización (a) y de la interacción del hidrogel (H) y el fertilizante (F) en el contenido total de P de plantas de <i>Pinus cembroides</i> subsp. <i>orizabensis</i> . H-=sin hidrogel; H+=con hidrogel; F0=sin fertilizante; F1=fertilizante hidrosoluble; F2=fertilizante de lenta liberación (Osmocote Plus®).	38
Figura 15. Efecto del factor hidrogel (H) en el contenido total de K de plantas de <i>Pinus cembroides</i> subsp. <i>orizabensis</i> . H-=sin hidrogel; H+=con hidrogel.....	39
Figura 16 Contenido de humedad (%) del suelo a diferentes distancias de la planta y en diferentes fechas de medición durante la temporada de secas, en plantas de <i>Pinus cembroides</i> subsp. <i>orizabensis</i> , con (H+) y sin (H-) hidrogel en condiciones de campo.....	54
Figura 17. Contenido de humedad (%) del suelo a diferentes distancias de la planta y en diferentes fechas de medición durante la temporada de secas, en plantas de <i>Pinus cembroides</i> subsp. <i>orizabensis</i> , con (F+) y sin (F-) aplicación de fertilizante de libe lenta liberación en condiciones de campo.	56
Figura 18. Tasa promedio de precipitación diaria (mm/día) durante el periodo de evaluación. Precipitación promedio próximo a tiempo real, por área (0.25 grados) en coordenadas 19.6250 N, -98.6250 LO; satélite TRMM_3B42RT de la NASA.....	57

Figura 19. Porcentaje de plantas con brotación de yema por efecto de la aplicación de hidrogel (H) y fertilizante de lenta liberación (F) en diferentes fechas de evaluación en plantas de <i>Pinus cembroides</i> subsp. <i>orizabensis</i> , en condiciones de campo.....	59
Figura 20. Alargamiento del brote por efecto de la aplicación de (a) hidrogel (H) y (b) fertilizante de lenta liberación (F), y dinámica de crecimiento del brote por efecto del (c) hidrogel y del (d) fertilizante en diferentes fechas de evaluación, en plantas de <i>Pinus cembroides</i> subsp. <i>orizabensis</i> , en condiciones de campo.	60
Figura 21. Tasa relativa de crecimiento en diámetro (TRCD) y altura (TRCA) por efecto la aplicación de hidrogel (H) (a, c) y fertilizante de lenta liberación (F) (b, d), en plantas de <i>Pinus cembroides</i> subsp. <i>orizabensis</i> en condiciones de campo...	63

INTRODUCCIÓN GENERAL

El uso de hidrogeles en la agricultura se ha dado desde hace unos cuarenta a sesenta años (Tehranifar, 2012; (Narjary *et al.*, 2013). Un hidrogel es un polímero de estructura tridimensional, con capacidad de retención de agua hasta de 500 a 600 veces su peso (Pizarro, 2015; Wei *et al.* 2016). Hay dos tipos de hidrogeles, poliacrilamidas solubles e insolubles. Las primeras son hidrosolubles y se han usado exitosamente para reducir la erosión del suelo en tierras irrigadas. Las poliacrilamidas insolubles, o estructuras reticuladas, no se disuelven, sino que forman un gel cuando se ponen en contacto con el agua. Estos hidrogeles representan una gran ventaja para la retención de agua y disminución de la frecuencia de riegos, por lo que comúnmente se utilizan en agricultura a cielo abierto o en invernaderos, o incluso en el manejo del paisaje, como el mantenimiento de áreas verdes en lugares áridos y semiáridos (Tehranifar, 2012).

Granados-Victorino *et al.*, (2015) mencionan que en gran medida y debido a la escasez de bosques en las zonas áridas y semiáridas, los bosques de piño piñonero (*Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*) son una de las comunidades de vegetación forestal que más ha sufrido afectaciones debido a disturbios naturales y antrópicos. Los incendios forestales, el sobreaprovechamiento (ej. pastoreo), condiciones ambientales desfavorables (suelos pedregosos y de poca humedad), cambio de uso del suelo y manejo inadecuado durante el aprovechamiento de la semilla, entre otros factores, han ocasionado daños en las plantas y en el banco de semillas (García *et al.*, 2014). Además del cambio climático, los factores anteriores han afectado las poblaciones de varias especies forestales, dentro de las cuales se encuentra esta especie de piñonero, distribuida principalmente en los estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. La importancia del piñonero radica en el aprovechamiento comercial con fines

alimenticios. Su fruto, conocido como “piñón” tiene un valor comercial importante en el mercado. Granados-Victorino, *et al.* (2015), sugieren la necesidad de generar planes de manejo y conservación de vegetación endémica de las zonas templadas a fin de conocer la distribución de los bosques de pino piñonero.

Esta investigación pretende aportar opciones para contribuir con una alternativa para la propagación y manejo de esta especie, con el propósito final de ampliar sus poblaciones en ambientes naturales, mediante programas de reforestación o plantaciones de conservación. La problemática en el establecimiento de *P. cembroides* subsp. *orizabensis* se presenta en áreas con bajos niveles de humedad. La investigación se encaminó en utilizar hidrogel como medio de retención de humedad y que demuestre, además del ahorro por un uso más eficiente del agua, efectos positivos en el establecimiento y crecimiento de plantas en condiciones controladas y en su hábitat natural, posterior al trasplante.

Además del agua, es importante hacer un uso eficiente de los fertilizantes como alternativa para reducir costos de producción, disminuir niveles de contaminación ambiental y favorecer el crecimiento de las plantas (Dorraji *et al.*, 2010; Rabat, *et al.*, 2016). El binomio agua-fertilizante se puede aprovechar de manera eficiente en el sector forestal a través de soluciones nutritivas que permitan una liberación paulatina de minerales en el sustrato (Rabat *et al.*, 2016), a través el uso de hidrogel, de tal manera que se promueva un uso eficiente del fertilizante en vivero y campo, y favorecer el establecimiento y crecimiento de las plantas en diferentes tipos de suelo, especialmente donde existan condiciones limitativas (Orikiriza *et al.*, 2013).

Para abordar la problemática descrita, este trabajo de investigación se organizó en dos etapas principales, los cuales se describen en este documento en forma de capítulos. En el primero se estudió la eficiencia del hidrogel (poliacrilatos de potasio) y aplicación de fertilizante sobre

el consumo de agua, crecimiento y absorción de nutrimentos en plantas de *P. cembroides* subsp. *orizabensis*, en etapa de vivero. Como parte de la evaluación de la absorción de nutrimentos, se determinó el contenido y concentración de los macro-elementos (N, P y K) en los componentes de la planta. En el segundo capítulo se evaluó la eficiencia del uso de poliacrilatos de potasio (hidrogel) y de la aplicación de fertilizante de lenta liberación, en el establecimiento de esta especie bajo condiciones campo. Se evaluó la eficiencia de un polímero súper-absorbente (PSA), a base poliacrilatos de potasio, en el establecimiento de una plantación de *P. cembroides* subsp. *orizabensis* en condiciones ambientales similares a las de su área de distribución natural. Durante el periodo de secas se evaluó el contenido de humedad en el suelo y el desarrollo fenológico de la yema terminal, así como la supervivencia y la tasa relativa de crecimiento en diámetro y altura de las plantas.

LITERATURA CITADA

- Dorraji, S. S., Golchin, A., y Ahmadi, S. (2010). The effects of hydrophilic polymer and soil salinity on corn growth in sandy and loamy soils. *Clean - Soil, Air, Water*, 38(7), 584–591. <https://doi.org/10.1002/clen.201000017>
- García, F. E., Ramírez-García, E. O., Mendizabal-Hernández, L. del C., Alba-Landa, J., y Márquez Ramírez, J. (2014). Parámetros de producción de semillas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis* D.K. Bailey de una plantación en la región de Perote, Veracruz, Mexico. *Foresta Veracruzana: Recursos Genéticos Forestales*, 16(2), 37–42. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49732560005>
- Granados-Victorino, R. L., Granados-Sánchez, D., y Sánchez-González, A. (2015). Caracterización y ordenación de los bosques de pino piñonero (*Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*) de la Cuenca Oriental (Puebla, Tlaxcala y Veracruz). *Madera Bosques*, 21(2), 23–42.

- Narjary, B., Pramila, A., Satyendra, K., y Meena, M. (2013). Significance of hydrogel and its application in agriculture. *Indian Farming*, 62(10), 15–17.
- Orikiriza, L. J. B., Agaba, H., Eilu, G., Kabasa, J. D., Worbes, M., y Hüttermann, A. (2013). Effects of hydrogels on tree seedling performance in temperate soils before and after water stress. *Journal of Environmental Protection*, 4(7), 713–721. <https://doi.org/10.4236/jep.2013.47082>
- Pizarro, R. (2015). El agua sólida promete regar en épocas de sequía. *Red Agrícola Agua y Riego*, Edición 72, 68–70. Recuperado de https://www.redagricola.com/sites/default/files/el_agua_solida_promete_regar_en_epocas_de_sequia_1.pdf
- Rabat, N. E., Hashim, S., y Majid, R. A. (2016). Effect of different monomers on water retention properties of slow release fertilizer hydrogel. *Procedia Engineering*, 148, 201–207. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.573>
- Tehranifar, A. (2012). Evaluation of application of superabsorbent polymers in green space of arid and semi-arid regions with emphasis on Iran. *Int . J . Forest , Soil and Erosion*, 2 (February), 24–36.
- Wei, J., Yang, H., Cao, H., y Tan, T. (2016). Using polyaspartic acid hydro-gel as water retaining agent and its effect on plants under drought stress. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 23(5), 654–659. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2015.08.016>

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar la eficiencia de poliacrilatos de potasio en el consumo de agua y como medio de fertilización en la producción de planta de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis* en vivero, y sus efectos sobre la humedad del suelo y crecimiento de las plantas en campo.

Objetivos específicos

1. Evaluar el efecto individual e interacción del hidrogel Lluvia Sólida[®] y del tipo de fertilizante en el consumo de agua, crecimiento, distribución de biomasa y absorción de N, P y K en planta de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*, en vivero.
2. Evaluar el efecto individual y el grado de interacción de la aplicación de hidrogel (Lluvia Sólida[®]) y de fertilizante de liberación prolongada en el contenido de humedad del suelo, la fenología del brote terminal y el crecimiento en diámetro y altura de plantas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis* establecidas en condiciones naturales.

CAPÍTULO 1. EFECTO DEL HIDROGEL EN EL CONSUMO DE AGUA, CRECIMIENTO Y ABSORCIÓN DE NUTRIMENTOS EN PLANTAS DE *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*, EN VIVERO

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de hidrogel y fertilizante en el consumo de agua, crecimiento y biomasa de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis* en vivero. Se empleó un arreglo factorial 2 x 3 en un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones. Los tratamientos incluyeron la combinación de hidrogel (con y sin hidrogel) y fertilizante (soluble, de lenta liberación y sin fertilizante). El consumo de agua se evaluó con el método gravimétrico durante 78 días. También se determinó la acumulación y distribución de biomasa, las tasas relativas de crecimiento (TRC) de diámetro y altura de las plantas, así como la concentración y contenido de nutrientes en los componentes de la planta. El hidrogel redujo el consumo de agua promedio en 16 %, y la TRC en altura en 35 %, pero sin afectar la TRC en diámetro ni la acumulación de biomasa. El fertilizante de lenta liberación aumentó el consumo de agua y redujo la TRC en diámetro y altura en 93 % y 57 %, respectivamente, así como la biomasa total (8 %) y la biomasa de raíces (15.4 %). Por otro lado, el fertilizante soluble aumentó la TRC en diámetro y altura en 43 % y 27 %, respectivamente, pero redujo la acumulación de biomasa del tallo en 15.6 %. El hidrogel y el tipo de fertilizante afectaron de manera diferenciada la concentración y contenido de NPK en los componentes de la planta. En los casos en los que se detectó una interacción significativa entre los dos factores en la absorción de nutrientes, se manifestó como antagonismo o interferencia del hidrogel con el fertilizante de liberación controlada y como sinergismo o neutralidad con el fertilizante soluble. Por lo tanto, es posible utilizar el hidrogel para ahorrar agua en la producción de planta y como medio de fertilización, en combinación con fertilizantes solubles, para favorecer la absorción de P y K.

Palabras Clave: Acumulación de biomasa, consumo de agua, contenido de nutrientes, distribución de biomasa, producción de planta, tasa relativa de crecimiento.

**EFFECT OF HIDROGEL ON WATER CONSUMPTION, GROWTH AND
ABSORTION ON NUTRIMENTS IN SEEDLINGS OF *Pinus cembroides* subsp.
orizabensis IN NURSERY**

ABSTRACT

The aim of this research was to evaluate the effect of hydrogel and fertilizer on water consumption, growth and biomass of *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis* in nursery. A 2 x 3 factorial arrangement was used in a randomized complete block design with three replications. The treatments included hydrogel (with and without) and fertilizer (soluble, slow-release, and no-fertilizer). The water consumption was evaluated with the gravimetric method during 78 days. Biomass accumulation and distribution, and relative growth rate (RGR) in diameter and height of seedlings were also evaluated, as well as nutrient concentration and content in the seedling components. Hydrogel reduced average water consumption by 16 % and RGR in height by 35 %, but without affecting RGR in diameter nor biomass accumulation. The slow-release fertilizer increased water use and reduced RGR in diameter and height by 93 % and 57 %, respectively, as well as total (8 %) and root (15.4 %) biomass. On the other hand, the water soluble fertilizer increased RGR in diameter and height, by 43 % and 27 %, respectively, and reduced accumulation of stem biomass by 15.6 %. Hydrogel and fertilizer type affected differently concentration and content of NPK in seedling components. In those cases, where a significant interaction between both factors was detected, it appeared as antagonism or interference of hydrogel with the slow-release fertilizers and as synergism o neutrality with the soluble fertilizer. Thus, it is possible to use hydrogel to save water in seedling production and as a method of fertilization, combined with soluble fertilizers, to facilitate P and K absorption.

Keywords: Biomass accumulation, biomass partitioning, nutrient content, relative growth rate, seedling production, water consumption,

INTRODUCCIÓN

La disminución del agua disponible en el mundo por efecto del cambio climático (Sandoval *et al.*, 2017) representa un reto para el sector agronómico y forestal (Orikiriza *et al.*, 2013). En este último, el uso ineficiente del agua en la producción de plantas pone en riesgo el óptimo crecimiento de éstas (Dorraji *et al.*, 2010) y el uso inadecuado de fertilizantes en la agricultura llega a ocasionar pérdidas entre 40 y 70% de nitrógeno, 80 a 90% de fósforo y entre el 50 y 70% de potasio en algunos cultivos (Rabat *et al.*, 2016). Un manejo adecuado de cultivos, la gestión de políticas sustentables, las buenas prácticas y la utilización de biotecnologías, pueden coadyuvar al uso eficiente del agua y fertilizantes, como una alternativa a la solución del problema (Dorraji *et al.*, 2010; Orikiriza *et al.* 2013; Pedroza-Sandoval *et al.* 2015; Rabat *et al.*, 2016).

Una tecnología disponible y ampliamente utilizada son los hidrogeles o retenedores de humedad hechos a base de polímeros sintéticos capaces de retener hasta 500 veces su peso en agua dentro de su estructura (Pizarro, 2015). Se pueden aprovechar sus propiedades y combinarse con soluciones nutritivas que, en el sustrato y en contacto con la planta, los nutrimentos estén siempre disponibles y la planta los absorba paulatinamente (Rabat *et al.*, 2016). Esta tecnología puede ser de gran uso en el sector forestal, en particular en la producción de plantas, y contribuir a la reducción del consumo de agua y favorecer el uso eficiente de fertilizantes, dando la posibilidad de aumentar el éxito de supervivencia en el establecimiento de plantaciones sobre diferentes tipos de suelo (Orikiriza *et al.*, 2013). La combinación del hidrogel como retenedor de humedad y fuente de nutrimentos como soluciones nutritivas y fertilizantes, podría ser una alternativa viable para contrarrestar el uso inadecuado del agua (Rabat *et al.*, 2016).

Algunos estudios proponen que el uso de hidrogel en la producción de plantas en vivero puede mejorar las condiciones del sustrato al aumentar el contenido de humedad, ya que retiene grandes cantidades de agua y a su vez reducen la pérdida de nutrientes por lixiviación (Brucker-Kelling *et al.* 2017; Rabat *et al.*, 2016). La pérdida de nutrientes propicia un déficit en el crecimiento y desarrollo de las plantas, ocasionando mayores costos de producción y aumentando la contaminación en el suelo (Landis, 1989). Viero y Little (2006) aplicaron hidrogel en la producción en vivero de plantas de eucalipto (*Eucalypto* spp.) en vivero y mostraron que las plantas tratadas con hidrogel presentaron mayor crecimiento en la etapa inicial y mayor supervivencia al plantarlas en campo, bajo condiciones adversas. Los autores sugieren que el hidrogel combinados con nutrientes puede remplazar a los fertilizantes granulares que se usan de forma convencional denominados de lenta liberación. En este trabajo se usó un hidrogel a base de poliacrilatos de potasio y de dos tipos de fertilizante en la producción de plántulas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*, con el objetivo de evaluar su efecto en el consumo de agua, el crecimiento, la distribución de biomasa y la absorción de los nutrientes N, P y K bajo condiciones de vivero, en los componentes tallo, raíz, hojas verdes y hojas secas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización y condiciones del experimento

El experimento se realizó en el vivero forestal del Colegio de Postgraduados (COLPOS), Campus Montecillo; ubicado en Km 36.5 Carretera México-Texcoco, Montecillo, Estado de México (19° 27' 38.3" LN y 98° 54' 24" LO, a una altitud de 2243 m). El experimento se estableció el 20 de octubre de 2017 en condiciones de invernadero y tuvo una duración de 79

días. Como sustrato se utilizó corteza de pino, en una mezcla de dos tamaños (70 % menor de 4 mm y 30 % mayor de 4 mm). El sustrato se esterilizó en una autoclave, a temperatura > 100 °C durante 5 h. El sustrato tuvo una densidad aparente de 0.31 g cm⁻³; un valor de pH de 2.69; conductividad eléctrica de 0.17 dS m⁻¹; 2.81 % de nitrógeno total; 26.79 ppm de fósforo; potasio: 0.22 cmol_c kg⁻¹; calcio: 7.0 cmol_c kg⁻¹; magnesio: 3.9 cmol_c kg⁻¹; sodio: 0.69 cmol_c kg⁻¹; boro: 0.83 ppm; cobre: 12.89 ppm; hierro: 382.19 ppm; manganeso: 163.12 ppm; y zinc: 47.35 ppm. El hidrogel utilizado fue a base de poliacrilatos de potasio de la marca comercial Lluvia Sólida®. En el ensayo se establecieron 450 plantas de *P. cembroides* subsp. *orizabensis*, de 14 meses de edad, producidas en el Vivero “La Gloria”, en la localidad Los Molinos, municipio de Perote, Veracruz, con semilla recolectada en la localidad de San Pedro, municipio de Tepeyahualco, Puebla.

Diseño experimental y establecimiento del ensayo

El ensayo se estableció con un arreglo factorial 2 x 3 en un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones. El primer factor fue “hidrogel” (H), con dos niveles (H-, sin hidrogel; y H+, con hidrogel) y el segundo factor fue “fertilizante” (F), con tres niveles (F₀, sin fertilizante; F₁, fertilizante soluble; y F₂, fertilizante de lenta liberación), para un total de seis tratamientos. Cada unidad experimental estuvo constituida por 25 plantas colocadas en tubetes de plástico con capacidad de un litro (8.3 cm de diámetro y 18.5 cm de longitud). Las plantas se agruparon por clases de altura (6-7 cm; 7-8 cm; y 8-10 cm) para su distribución en los bloques del ensayo, con el propósito de homogeneizar el tamaño al asignar los tratamientos a cada unidad experimental. Se seleccionaron plantas sin daños visibles ni marchitamiento y sin brotes secundarios o ramillas. En los tratamientos H+, en cada envase se aplicó 1 g de hidrogel disuelto en 130 mL de agua destilada, excepto en el tratamiento

H+F₁, en el que fue necesario usar 2 g de hidrogel para absorber 130 mL de solución nutritiva, debido a que las sales en la solución modificaron la capacidad del hidrogel para retener agua. En los tratamientos F₁ se utilizaron 130 mL de una solución formulada con fosfato de potasio (KH₂PO₄), nitrato de amonio (NH₄NO₃) y nitrato de potasio (KNO₃) para igualar al tratamiento con Osmocote Plus® y usado en los tratamientos F₂ adicionando 7 g de Osmocote Plus® (NPK, 15-9-12) por envase.

Al momento del trasplante se podaron las raíces de las plantas en los contenedores, con longitud no mayor a la de los envases, y posteriormente se desinfectaron con una solución de Captan® 50 (1.5 g L⁻¹), durante 15 min para evitar la presencia de hongos. El hidrogel y el fertilizante, mezclado con una parte del sustrato, se colocaron en la parte media del envase al momento del trasplante, excepto en el caso del tratamiento con fertilizante soluble (H-F₁), en el que se aplicó posteriormente, al momento de hacer los riegos.

Evaluación del consumo de agua

El consumo de agua se evaluó con el método gravimétrico. Con base en la curva de retención de humedad del sustrato, determinada con el método de embudos (Pattanaaik *et al.* 2015; El-Asmar *et al.* 2017), se calculó la cantidad de agua necesaria para llevar el contenido de humedad del sustrato a capacidad de campo (51 %). A partir de este punto se permitió que el contenido de humedad descendiera hasta 35 % y en ese momento se repuso el agua perdida por transpiración y evaporación, para iniciar un nuevo ciclo de consumo de agua. El proceso se repitió durante 78 días, el cual se dividió en cinco periodos con base en la duración de los ciclos de riego en cada uno de los tratamientos. Con los datos del agua agregada al final de cada ciclo y la duración de éstos se calculó el consumo promedio de agua por día en cada

planta. Para separar el efecto del hidrogel en el consumo de agua por transpiración y la pérdida por evaporación, se evaluó también la pérdida de agua en una muestra de 20 envases sin plantas, con y sin hidrogel, durante 68 días.

Medición del crecimiento y distribución de biomasa en las plantas

Al inicio y al final del periodo de estudio se midió el diámetro en la base del tallo (D) con un vernier digital y la altura total (A) con una regla graduada en cm, en cada una de las plantas. Con estos datos se calculó la tasa relativa de crecimiento (TRC) en diámetro y altura por planta, con la siguiente ecuación (Valladares-Ros *et al.*, 2008): $TRC = [\ln (P_2) - \ln (P_1)] / [(t_2 - t_1)]$; Dónde: P₁ y P₂: son los valores inicial (P₁) y final (P₂) de las características (D o A), respectivamente, y t₂ - t₁ es la duración (en meses) del periodo de evaluación. Con los datos obtenidos se estimó la TRC promedio por parcela.

Al inicio del experimento también se realizó un análisis destructivo en una muestra de ocho plantas por bloque, para estimar la biomasa existente en cada uno de sus componentes. El mismo procedimiento se realizó al final del estudio en todas las plantas del ensayo. En cada planta se separaron los componentes raíz, tallo, hojas verdes y hojas secas; se determinó el peso fresco en una balanza de precisión, se guardaron en bolsas de papel y se secaron en un horno a 75° C, por un periodo de 72 h, para determinar la biomasa (peso seco). Además se estimó el contenido de humedad, en porcentaje del peso fresco, de los componentes y de la planta (Flores-Nieves *et al.*, 2011).

Evaluación de la concentración y contenido de N, P y K por órgano

Con las plantas del análisis de biomasa se integraron cuatro muestras compuestas, una por unidad experimental; en cada muestra de material seco se determinó la concentración de N,

P y K. La concentración de N se realizó por el método Micro-Kjeldahl (Bremner, 1965). La concentración de P y K se determinó en el extracto resultante de la digestión húmeda del material vegetal seco, empleando un equipo de espectroscopia de emisión atómica de plasma acoplado por inducción (ICP-AES Agilent 725AES) de acuerdo con lo descrito por Alcántar y Sandoval (1999). Con los datos de concentración de los elementos N, P y K y los datos de biomasa por componente (raíz, tallo, hojas verdes y hojas secas), se estimó el contenido total de N, P y K por componente y por planta.

Análisis estadístico

Se utilizó el paquete estadístico Statistical Analysis System (SAS), versión 9.4 para realizar el análisis de los datos de consumo de agua, crecimiento y contenido nutricional. El consumo de agua se analizó con un modelo de medidas repetidas con el procedimiento MIXED, considerando los factores H y F y su interacción como efectos fijos, los bloques como efectos aleatorios y los cinco periodos de consumo de agua como medidas repetidas en los sujetos. Con el mismo modelo estadístico, pero sin incluir las medidas repetidas, se realizó el análisis de varianza para la TRC en altura y diámetro, así como para las variables de biomasa, contenido de humedad, concentración y contenido de nutrientes en los componentes de las plantas. En el análisis se utilizaron los valores promedio por parcela.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Consumo de agua

El consumo de agua promedio por día fue afectado de manera significativa ($p < 0.05$) por la aplicación de hidrogel y por el fertilizante, de manera individual y en forma conjunta, por su

interacción. El periodo de evaluación también afectó de manera individual el consumo de agua (**Cuadro 1**).

Cuadro 1. Resultados del análisis de varianza (valor de p) del efecto de los factores hidrogel y fertilizante sobre el consumo de agua en plantas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis* evaluado en diferentes periodos de medición.

Fuente de variación	Valor de F	Significancia (p)
Hidrogel	73.67	<0.001
Fertilizante	47.72	<0.001
Hidrogel x fertilizante	91.27	<0.001
Periodo	25.21	<0.001
Periodo x hidrogel	0.52	0.719
Periodo x fertilizante	1.26	0.281
Periodo x hidrogel x fertilizante	0.97	0.971

La aplicación del hidrogel redujo el consumo de agua promedio en todos los periodos de evaluación. Las plantas con el tratamiento H- tuvieron un consumo promedio de 11.44 mL de agua por día, mientras que en las plantas en el tratamiento H+ el consumo de agua promedio por día fue de 9.64 mL, 15.7 % menos que en H- (**Figura 1a**). Por lo tanto, el uso del hidrogel resultó ser efectivo al reducir el consumo de agua en las plantas de *P. cembroides* subsp. *orizabensis* durante la fase de vivero. Un comportamiento similar se encontró en el estudio realizado por Anupama *et al.* (2007) en plantas de crisantemo (*Chrysanthemum* cv.) en un sustrato formado por la mezcla de cáscara de coco, vermiculita y perlita en una proporción de 6: 1: 1, aplicando 0.5 % y 1.0 % de hidrogel. En dicho estudio se redujo el número de riegos requeridos, desde 10 (para el testigo, sin hidrogel) hasta 4 en los tratamientos que usaron hidrogel. Brucker-Kelling *et al.* (2017), en su trabajo con plantas de *Cordia trichotoma*, encontraron que la aplicación de 2.4 g L⁻¹ de un polímero hidrorretenedor

redujo la aplicación de una lámina de agua a una tercera parte de la requerida sin el hidrogel. Asimismo, Navroski *et al.* (2015) comprobaron que la aplicación de 3 g L⁻¹ de hidrogel posibilitó la reducción de la lámina de riego hasta en un 40 %, al producir plantas en vivero de *Eucalyptus dunnii* Maiden.

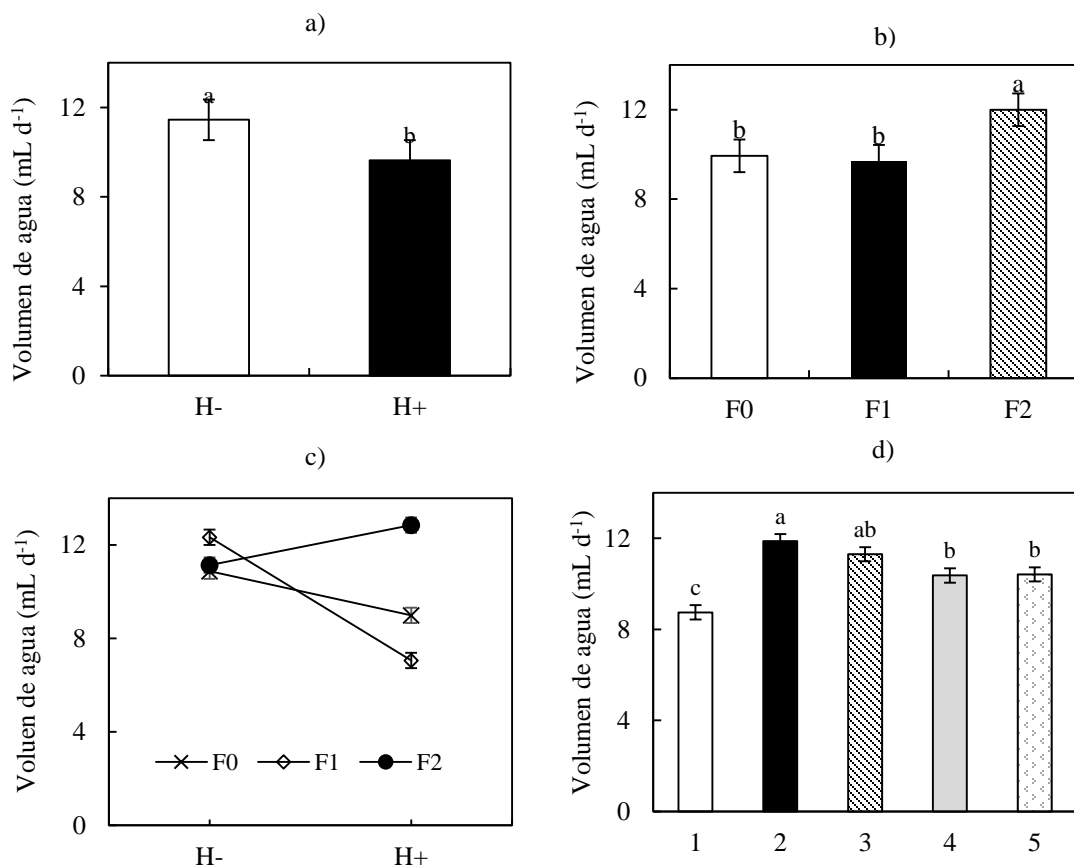


Figura 1. Efecto de los factores hidrogel (a), fertilizante (b) y sus interacciones (c), así como del periodo de evaluación (d) sobre el consumo de agua promedio por día (mL d⁻¹) en plantas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*. H-, sin hidrogel; H+, con hidrogel; F0=sin fertilizante; F1=fertilizante hidrosoluble; F2=fertilizante de lenta liberación (Osmocote Plus®); 1, 2, 3, 4 y 5, periodos de evaluación.

La prueba que se realizó con envases sin plantas mostró las mismas tendencias al aplicar hidrogel; la pérdida de agua por evaporación por día en los envases con hidrogel fue 42.7 % menor que en los envases sin hidrogel; 7.1 mL y 12.4 mL, respectivamente. Estos resultados

tienen la misma tendencia que los envases con planta, pero el volumen de agua perdido por evaporación-transpiración fue menor, lo que hace suponer que las raíces de la planta en el sistema planta-hidrogel-sustrato y la parte aérea de la planta, reducen la pérdida de agua por evaporación.

El efecto individual del factor fertilizante en el consumo de agua se reflejó fundamentalmente en las plantas que recibieron el fertilizante de lenta liberación (F_2); mostrando un mayor consumo de agua (**Figura 1b**). Las plantas en este tratamiento mostraron un consumo de agua promedio de 11.9 mL d^{-1} , lo que representa 19.5 % más que en los tratamientos sin fertilizante (F_0) y con fertilizante hidrosoluble (F_1), los cuales tuvieron un consumo de agua promedio de 9.97 y 9.93 mL d^{-1} , respectivamente (**Figura 1b**). Hasta ahora, no se ha encontrado evidencia de que exista una relación directa entre el efecto de un fertilizante y el consumo de agua; sin embargo, es posible suponer que el fertilizante de lenta liberación modificó el potencial matricial en el sustrato lo cual provocó una pérdida más rápida de agua (Arriaga, 2009).

En la interacción de los factores hidrogel (H) y fertilizante (F) (**Figura 1c**) la combinación de $H+$ y F_1 ocasionó una reducción en el consumo de agua con respecto al testigo ($H-F_0$), mientras que la combinación de $H+$ y F_2 ocasionó un aumento en el consumo de agua. Esto indica que el hidrogel de manera individual, o en combinación con el fertilizante hidrosoluble, favorece el ahorro de agua y que la combinación de hidrogel con fertilizante de lenta liberación ocasiona un gasto mayor. Esto podría deberse a una reacción antagónica del fertilizante de lenta liberación, ya que éste requiere de humedad constante para liberar gradualmente los nutrimentos; absorbe el agua disponible encapsulada en el hidrogel y

permite que las sales liberadas del fertilizante se adhieran a la estructura del hidrogel, reduciendo su capacidad para retener agua (Guilherme *et al.*, 2015).

En relación a los periodos de consumo de agua (**Figura 1d**), se observa que las diferencias significativas agrupan los periodos 1, 2-3 y 4-5. Es decir, hubo una tendencia a aumentar el consumo de agua en los periodos 2 y 3, que puede atribuirse al gasto por rehidratación después del primer periodo, y posteriormente se reduce ligeramente y se estabiliza nuevamente al final del periodo de evaluación.

Crecimiento y acumulación de biomasa en *P. cembroides* subsp. *orizabensis*

El hidrogel (H) afectó de manera significativa ($p=0.026$) la tasa relativa de crecimiento en altura (TRCA) y el contenido de humedad CH ($p=0.008$), pero no afectó la tasa relativa de crecimiento en diámetro (TRCD) ni la acumulación de biomasa (**Cuadro 2**). En cambio, el fertilizante afectó de manera significativa la TRCD, TRCA, el CH y la acumulación de biomasa en tallo, raíces y total. En ningún caso la interacción de los factores fue significativa (**Cuadro 2**).

Cuadro 2. Resultados del análisis de varianza (valor de p) del efecto de los factores hidrogel y fertilizante sobre la tasa relativa de crecimiento (TRC) en diámetro y altura, contenido de humedad (CH) y acumulación de biomasa en las plantas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*.

Fuente de variación	(TRC)			Biomasa			
	Diámetro	Altura	(CH)	Tallo	Hojas	Raíces	Total
Hidrogel (H)	0.077	0.026	0.008	0.756	0.839	0.089	0.610
Fertilizante (F)	0.016	0.001	0.001	0.001	0.460	0.001	0.033
H x F	0.929	0.200	0.064	0.513	0.247	0.117	0.151

De acuerdo con los resultados, el hidrogel no mostró diferencias significativas ($p=0.077$) sobre la TRCD, con valores muy bajos en ambos tratamientos (**Figura 2a**); en cambio, el hidrogel (H+) ocasionó una reducción significativa de 35 % en la TRCA, con respecto al testigo (H-) (**Figura 2c**). El uso del fertilizante de liberación controlada (F₂) redujo la TRCD y la TRCA en 93 y 57 % con respecto al testigo (F₀), a diferencia del fertilizante hidrosoluble (F₁) que tuvo un efecto positivo en la TRC de ambas características, que fue 43 % mayor en diámetro y 27 % mayor en altura, con respecto a F₀ (**Figura 2b y 2d**).

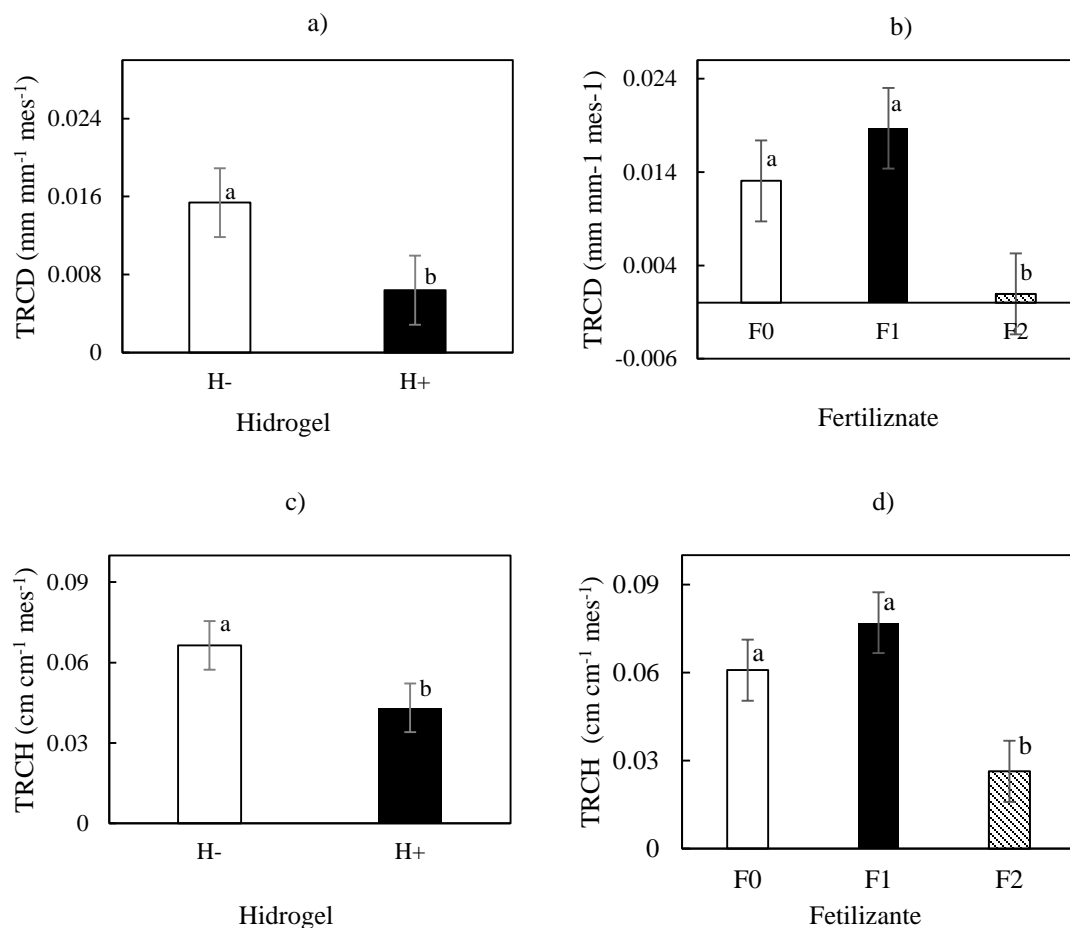


Figura 2. Efecto de los factores hidrogel (a, c) y fertilizante (b y d), sobre la tasa relativas de crecimiento en diámetro (TRCD) y altura (TRCA) en plantas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*. H-, sin hidrogel; H+, con hidrogel; F₀=sin fertilizante; F₁= fertilizante hidrosoluble; F₂=fertilizante de lenta liberación (Osmocote Plus®).

El contenido de humedad (CH) en las plantas se redujo de 60.3 % al inicio del experimento hasta 55.9 %, en promedio de todos los tratamientos, al final del ensayo. Por otro lado, al final del estudio, las plantas con hidrogel (H+) presentaron un CH 4.5 % menor que las plantas sin hidrogel (H-) (**Figura 3a**). En el caso de la fertilización, el uso del fertilizante soluble (F₁) mantuvo en las plantas un contenido de humedad similar al testigo, mientras que el fertilizante de liberación controlada (F₂) redujo en 7.5 % el contenido de humedad en las plantas (**Figura 3b**).

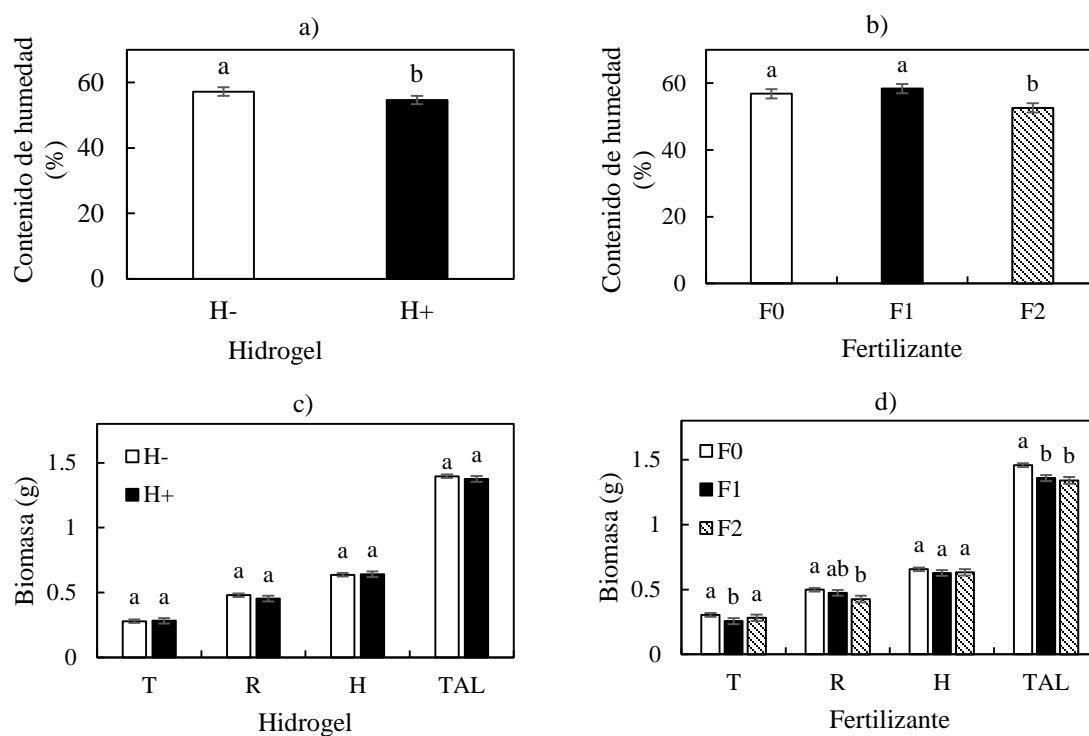


Figura 3. Efecto del hidrogel (a, c) y fertilizante (b, d) sobre el contenido de humedad (a, b) y la biomasa (c, d) de tallo (T), raíz (R), hojas (H) y total (TAL) en plantas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*. H-, sin hidrogel; H+, con hidrogel; F₀=sin fertilizante; F₁=fertilizante hidrosoluble; F₂=fertilizante de lenta liberación (Osmocote Plus®).

La biomasa total aumentó en promedio 17.9 % con respecto al valor inicial (de 1.17 g a 1.38 g al final de la prueba), independientemente de los tratamientos. El hidrogel no afectó la

acumulación de biomasa en ninguno de los componentes analizados (tallo, raíz y hojas) (**Figura 3c**). En cambio, la aplicación de fertilizante tuvo un efecto negativo sobre la acumulación de biomasa total, con una reducción en F_1 y F_2 de entre 7.0-8.0 %, con respecto al testigo (**Figura 3d**). Sin embargo, la aplicación del fertilizante de liberación controlada (F_2) afectó principalmente la acumulación de biomasa en la raíz, con una reducción de 15.4 % en comparación con el testigo (F_0), mientras que el fertilizante hidrosoluble (F_1) afectó principalmente la acumulación en el tallo, con un 15.6 % menos que el testigo (**Figura 3d**).

Concentración y contenido de N P y K

El hidrogel afectó significativamente la concentración de N en raíces, la concentración y contenidos de P en tallo y hojas secas, y el contenido de P en hojas verdes (Cuadro 3). El hidrogel (H) también afectó la concentración y contenido de K en tallos y hojas secas, la concentración de K en raíces y el contenido total de K en la planta. Como es evidente, entre nutrientes, el P fue el más afectado por el hidrogel (H) en los diferentes componentes de la planta (**Cuadro 3**).

Como se esperaba, El factor fertilizante (F) afectó de manera significativa la concentración y contenido de N y P en la mayoría de los componentes de la planta, con excepción de la concentración de N en hojas secas y de la concentración y contenido de N en raíces. Por otro lado, el fertilizante no tuvo efecto en la concentración y contenido de K en hojas verdes, ni en su concentración en hojas secas y el contenido total (**Cuadro 3**). La interacción de los factores de estudio (H x F) fue significativa únicamente para la concentración y contenido de N y P en hojas verdes y raíces y el contenido total en la planta, así como para la concentración y contenido de K en raíces (**Cuadro 3**).

Cuadro 3 Resultados del análisis de varianza (valor de p) del efecto de los factores hidrogel (H), fertilizante (F) y su interacción (H x F) en la concentración y contenido de los nutrimentos N, P y K en tallo, hojas verdes, hojas secas, raíz, y contenido total en plantas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*.

Factor	Tallo		Hojas verdes		Hojas secas		Raíz		Planta total
	Conc.	Cont.	Conc.	Cont.	Conc.	Cont.	Conc.	Cont.	Cont.
<u>Nitrógeno (N):</u>									
H	0.402	0.524	0.564	0.096	0.702	0.141	0.018	0.835	0.851
F	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.417	0.030	0.610	0.053	0.027
H x F	0.957	0.851	0.007	0.049	0.292	0.100	0.023	0.008	0.007
<u>Fosforo (P):</u>									
H	0.006	0.016	0.363	0.002	<0.001	<0.001	0.894	0.060	0.338
F	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
H x F	0.076	0.090	0.010	0.016	<0.001	0.170	<0.001	<0.001	<0.001
<u>Potasio (K):</u>									
H	<0.001	<0.001	0.565	0.280	0.003	<0.001	0.024	0.072	0.025
F	<0.001	<0.001	0.732	0.090	0.111	0.002	0.012	0.004	0.300
H x F	0.239	0.085	0.336	0.358	0.816	0.569	<0.001	<0.001	0.153

El hidrogel aumentó en 7.3 % la concentración de N en raíz (**Figura 4b**), pero no afectó su concentración ni contenido en los otros componentes. Esta respuesta encontrada en N por el factor hidrogel son congruentes con el mecanismo de acceso del N; se ha reportado que cerca de 70 % del N requerido por una planta ingresa mediante flujo de masas (Alcántar *et al.*, 2016). El flujo de masas es un mecanismo asociado con el gradiente de potencial total, que regula el movimiento de agua en el sistema suelo-planta-atmósfera (Mota *et al.*, 2010). Asimismo, al tener alta concentración de N en raíces de plantas tratadas con hidrogel, se presume que existió por tanto alta tasa de absorción de este elemento, lo cual se traduce en una partición adecuada de este elemento en el resto de los órganos de la planta (**Figura 4b**).

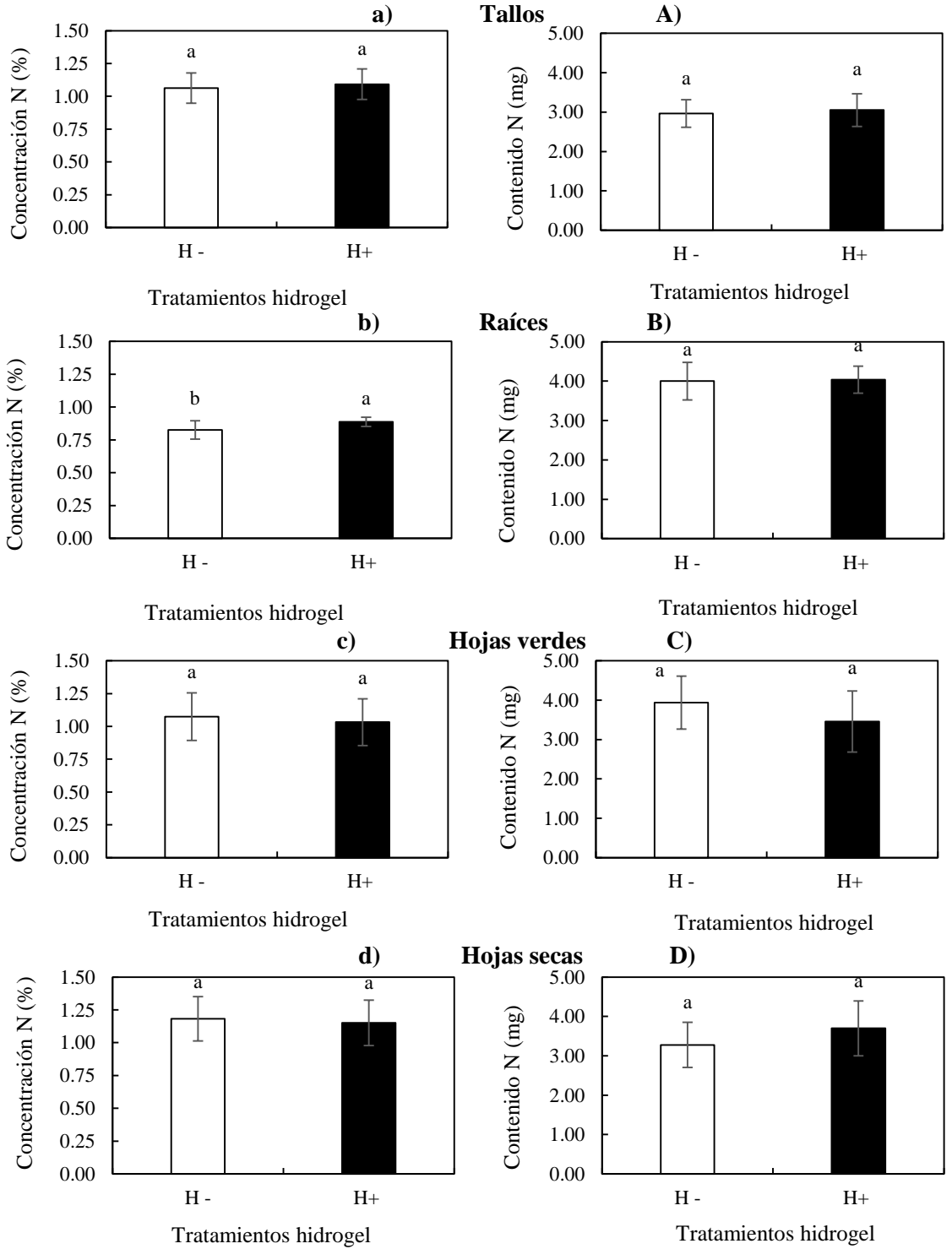


Figura 4. Efecto del hidrogel (H) en la concentración y contenido de nitrógeno (N) en tallos (a, A), raíces (b, B), hojas verdes (c, C) y hojas secas (d, D) de plantas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*. H-=sin hidrogel; H+=con hidrogel

La ausencia de hidrogel (H-) no ocasionó una reducción importante en la concentración y contenido de N en los diferentes componentes, en comparación con los tratamientos con hidrogel (H+), debido posiblemente a la reposición constante de agua en el sustrato que impidió que el contenido de humedad disponible descendiera a menos de 35 %. Lo anterior indica que el suministro de agua ocasionó que el acceso del N a la raíz no fuera afectado (**Figura 4b**). Silber *et al.* (2003) reporta, por ejemplo, que una fertirrigación frecuente mejora la absorción de nutrimentos a través de dos mecanismos: el reabastecimiento continuo de nutrimentos en la zona de abatimiento en la vecindad de la interfase radical y al aumento en el transporte de nutrimentos disueltos por flujo de masas, debido al alto contenido de agua en el sustrato.

La adición de hidrogel aumentó el contenido de P alrededor de 8.2 % en tallos (**Figura 5A**) y 26.1 % en hojas secas (**Figura 5B**), pero lo redujo en 12.2 % en hojas verdes (**Figura 5C**). Altas acumulaciones de P en tallos y en hojas secas que se encuentran aún adheridas a la planta son indicadores de un estatus adecuado de este elemento en la planta, dado que estos órganos (tallos y hojas en senescencia) actúan como reservorio de P. El fósforo es un elemento de rápida movilidad y participa en actividades primordiales como la fotosíntesis; además, se transloca de manera muy rápida hacia los tejidos más activos, principalmente hojas verdes o para formar raíces nuevas (Fernández, 2007).

En este contexto, algunos autores sugieren que la adecuada hidratación del sustrato y la disponibilidad de cantidades necesarias de fósforo para abastecer la demanda en los tejidos jóvenes puede reducir la translocación del fósforo concentrado en tejidos longevos hacia las hojas más jóvenes (Ananías *et al.*, 2015) y es aquí donde el factor hidrogel

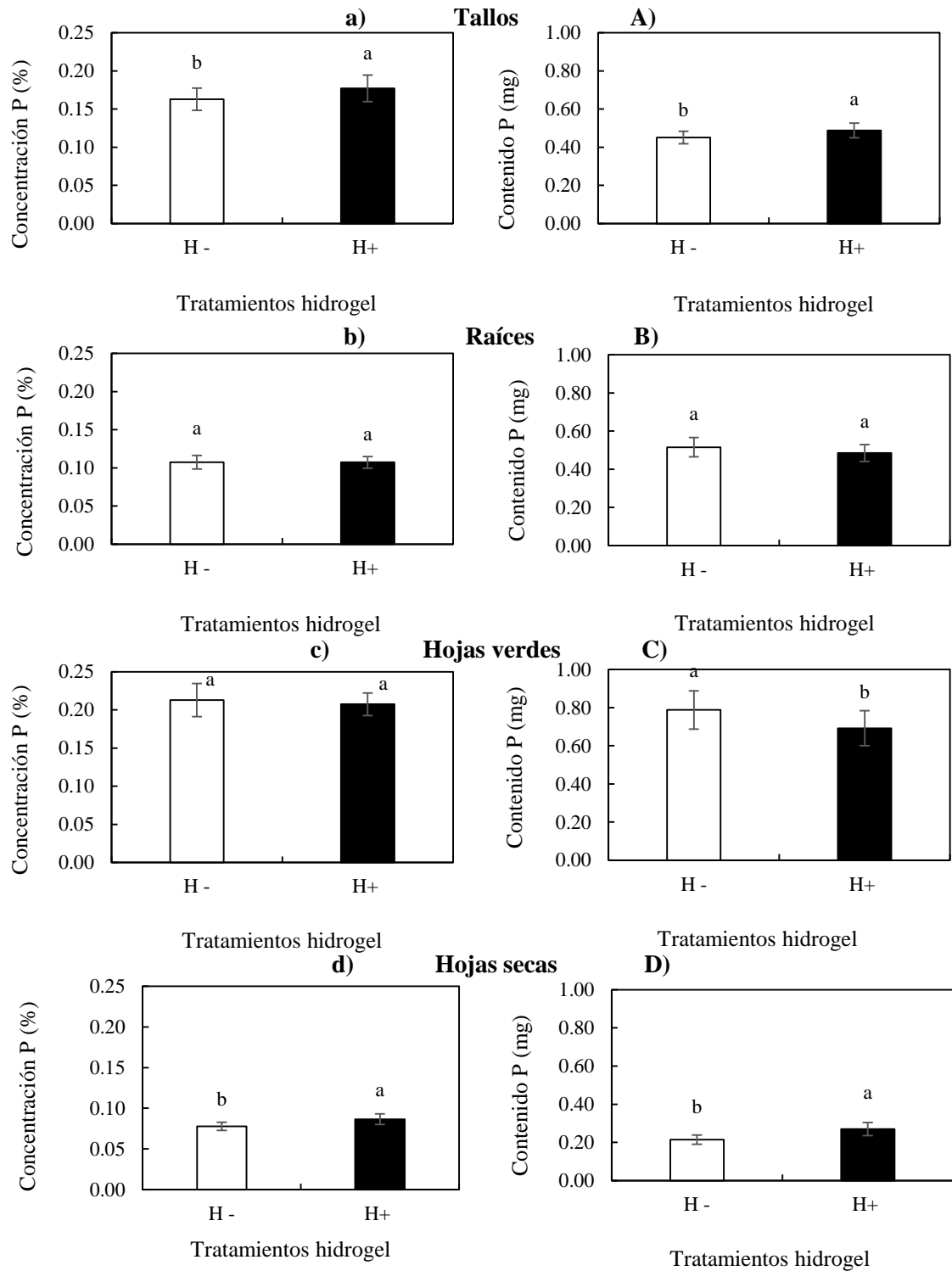


Figura 5. Efecto del factor hidrogel (H) en la concentración y contenido de fósforo (P) en tallos (a, A), raíces (b, B), hojas verdes (c, C) y hojas secas (d, D) de plantas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*. H-=sin hidrogel; H+=con hidrogel.

puede tener sus beneficios. Por otra parte, diversos estudios proveen una imagen de los patrones de movimiento de P en plantas completas. En plantas con suficiente P, la mayoría del P absorbido por las raíces es transportado en el xilema hacia las hojas jóvenes. Existe además una re-translocación significativa de fosfato en el floema desde hojas viejas para el crecimiento del vástago y desde los tallos hacia las raíces. Por el contrario, en plantas con deficiencia de P, el abastecimiento restringido de P hacia los tallos desde las raíces vía xilema, es complementado con un aumento en la movilización del P almacenado en hojas viejas y re-translocado tanto a hojas jóvenes como a raíces en crecimiento (Schachtman *et al.*, 1998).

La concentración y acumulación de K por efecto del factor hidrogel (H) mostró una tendencia similar a la del P (**Figura 6**). Al igual que el P, el K es un elemento altamente móvil dentro de la planta (Alcántar *et al.*, 2016). Además, el K es el catión esencial más abundante en plantas superiores y las funciones que realiza en plantas las realiza en su estado iónico; es decir, no tiene funciones estructurales (Wang *et al.*, 2013). En este sentido, una alta concentración de K en tallo causadas por la adición de hidrogel (H⁺) (**Figura 6A**), podría garantizar el transporte de ácidos orgánicos, aminoácidos y carbohidratos *in planta* (Alcántar *et al.*, 2016). En cuanto al efecto del fertilizante sobre la absorción de nutrientes, como se esperaba, los menores valores promedio en concentración y contenido de N en el tallo y en hojas verdes se registraron en ausencia de fertilizante (**Figura 7a-A y 7c-C**); por el contrario, la mayor concentración y acumulación se obtuvo con la adición de fertilizante de lenta liberación. Esto puede atribuirse a la naturaleza del fertilizante, que está protegido por un polímero que permite la liberación gradual del nitrógeno cerca de las raíces (Li *et al.*, 2017), y propicia una mejor absorción.

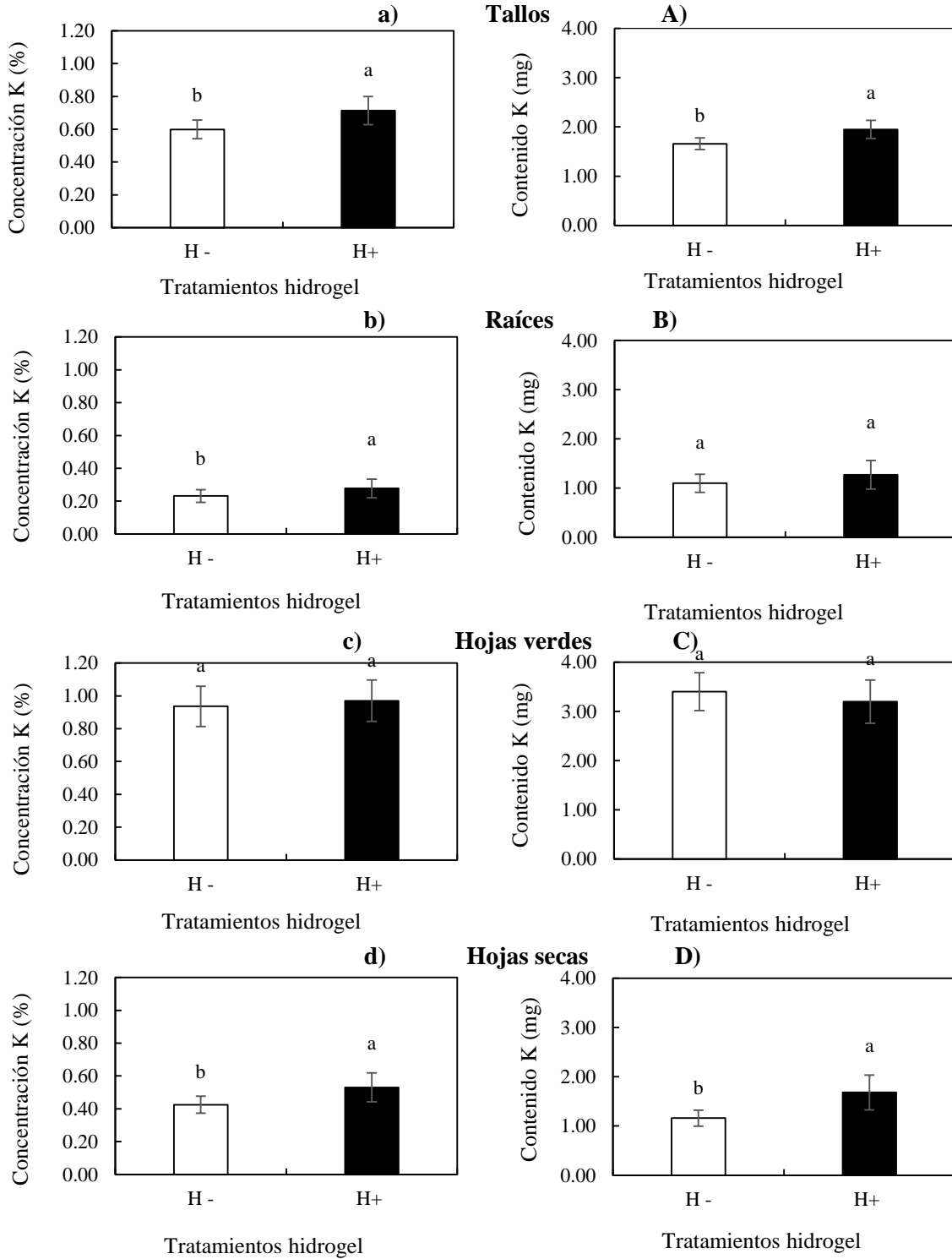


Figura 6. Efecto del factor hidrogel (H) en la concentración y contenido de potasio (K) en tallos (a, A), raíces (b, B), hojas verdes (c, C) y hojas secas (d, D) de plantas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*. H-=sin hidrogel; H+=con hidrogel.

Por otro lado, el fertilizante soluble (F_1) fue aplicado durante los riegos o colocado a la mitad del contenedor, encapsulado en hidrogel, lo cual pudo haber propiciado que el N estuviera lejos de la zona de absorción. A pesar de ello, en plantas no fertilizadas (F_0), la acumulación de N en las hojas secas fue superior en 21 y 19.4% a los valores registrados con fertilizante hidrosoluble (F_1) y de lenta liberación (F_2) (**Figura 7D**); lo cual indicaría un estatus de deficiencia de N.

Los fertilizantes nitrogenados convencionales, que se utilizan en la producción agrícola en todo el mundo, presentan el mismo problema. Una vez que son suministrados al suelo o sustrato, más de tres cuartas partes de su contenido nutrimental se lixivian antes de que las plantas puedan absorberlos (Kottegoda *et al.*, 2017); en este contexto, los fertilizantes de lenta liberación que aportan N pueden ser una alternativa.

Contrario a lo observado con el N, se observaron de manera general, mayor concentración y acumulación de P cuando se utilizó el fertilizante hidrosoluble (F_1), en comparación con el fertilizante de lenta liberación (F_2) o con plantas no fertilizadas (F_0) (**Figura 8**). Asimismo, destaca que en tallo, raíces y hojas verdes (**Figura 8A-B-C**), el contenido de P al usar fertilizante de lenta liberación (F_2) no fue diferente al testigo (F_0). Es importante indicar que el P es un elemento que accede a las raíces desde el suelo o sustrato, principalmente por difusión. De hecho, en maíz se ha estimado que cerca de 93% del requerimiento de P ingresa por este mecanismo (Alcántar *et al.*, 2016). Asimismo, una característica única del P es su baja disponibilidad debido a la lenta tasa de difusión y a la alta fijación en los suelos y en algunos sustratos (Shen *et al.*, 2011). En este contexto, resulta negativo suministrar el P a partir de fuentes con lenta liberación, como se observa en los resultados aquí obtenidos.

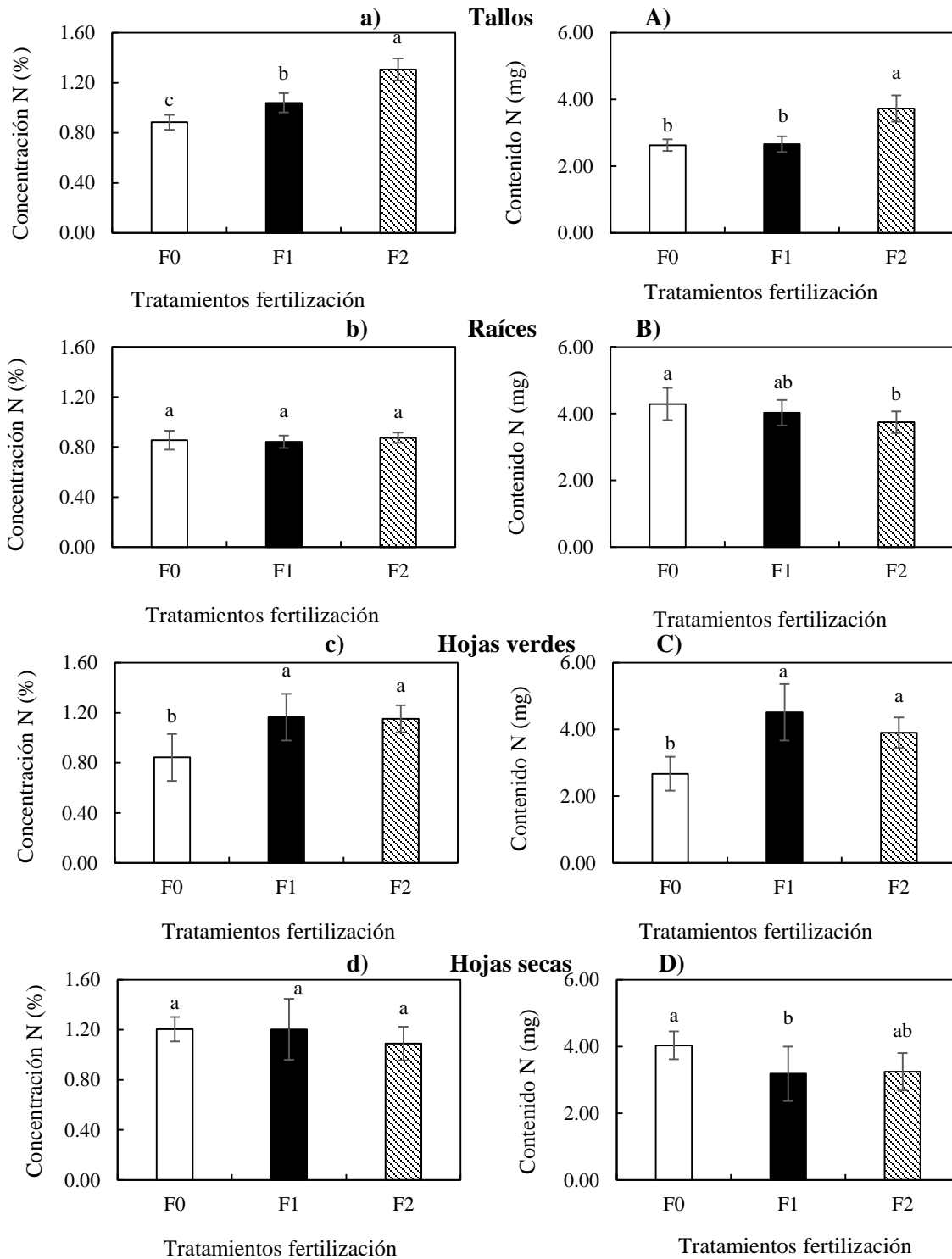


Figura 7. Efecto del factor fertilizante (F) en la concentración y contenido de nitrógeno (N) en tallos (a, A), raíces (b, B), hojas verdes (c, C) y hojas secas (d, D) de plantas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*. F0=sin fertilizante; F1=fertilizante hidrosoluble; F2=fertilizante de lenta liberación (Osmocote Plus®).

Por otra parte, en la concentración de P en raíces (**Figura 8D**) se observa una respuesta contraria al resto de los órganos; es decir, se observa mayor concentración de P en plantas sin fertilizar (F_0) y en aquellas suministradas con fertilizante hidrosoluble (F_1), mientras que la menor concentración ocurre en plantas con fertilizante de lenta liberación (F_2). En este último tratamiento, por tanto, existe un menor gradiente electroquímico ocasionado por el diferencial de concentración de P entre la raíz y la fuente de nutrimentos, lo cual tiene un efecto negativo en el proceso de difusión del P (Marschner, 2012).

El K, al igual que el P, tiene como principal forma de acceso a la difusión. En maíz se ha estimado que 80 % del K requerido es suministrado por difusión; mientras que 18 % ingresa por flujo de masas y solo 2 % por intercepción (Alcántar *et al.*, 2016). En este sentido, las tendencias en concentración y contenido observadas para K, en función de la fuente de fertilización empleada son muy parecidas a las de P (**Figura 9**).

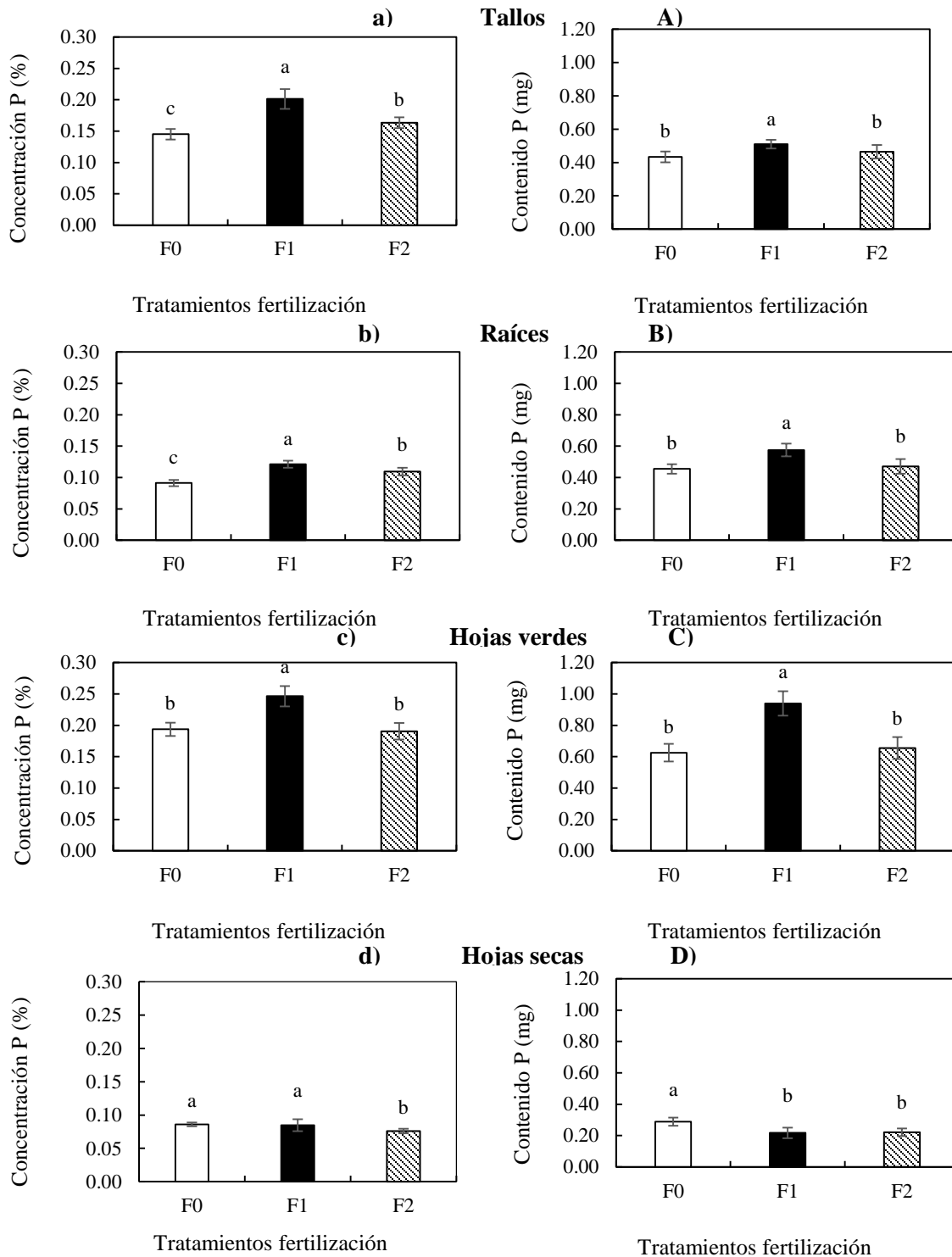


Figura 8. Efecto del factor fertilizante (F) en la concentración y contenido de fósforo (P) en tallos (a, A), raíces (b, B), hojas verdes (c, C) y hojas secas (d, D) de plantas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*. F0=sin fertilizante; F1=fertilizante hidrosoluble; F2=fertilizante de lenta liberación (Osmocote Plus®).

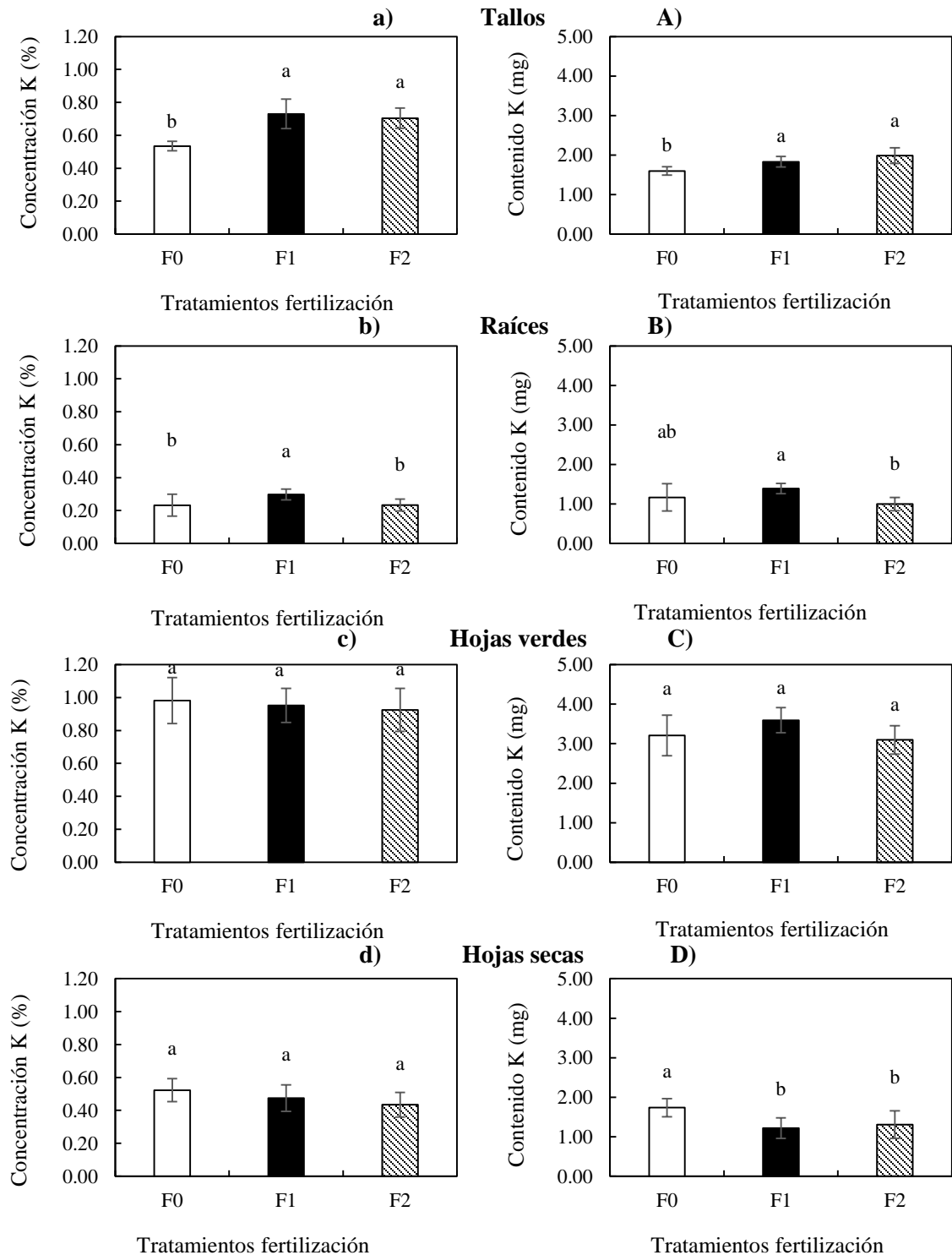


Figura 9. Efecto del factor fertilizante (F) en la concentración y contenido de potasio (K) en tallos (a, A), raíces (b, B), hojas verdes (c, C) y hojas secas (d, D) de plantas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*. F0=sin fertilizante; F1=fertilizante hidrosoluble; F2=fertilizante de lenta liberación (Osmocote Plus®).

La adición de hidrogel (H+) incrementó significativamente la concentración de N en la raíz de plantas no fertilizadas (F₀) (**Figura 10a**), pero la acumulación de N fue menor en plantas tratadas con hidrogel (H+) cuando se suministró fertilizante de lenta liberación (F₂). Es decir, se presentó un efecto antagónico (o de interferencia) entre el hidrogel y el fertilizante de lenta liberación (**Figura 10A**).

En hojas verdes, se observa en plantas no fertilizadas tratadas con hidrogel (H+) baja concentración de N respecto a aquellas plantas tratadas también con hidrogel, pero con otros fertilizantes (**Figura 10b**). En lo que a contenido de N respecta, se observa que el mejor tratamiento fue aquel resultado de la adición de hidrogel (H+) y el fertilizante hidrosoluble (F₁); sin embargo, no presenta diferencias estadísticas con aquellos tratamientos con algún tipo de fertilización, independientemente de la presencia de hidrogel en el sustrato (**Figura 10B**).

En el caso del P, la mayor concentración y acumulación en raíces se registró en plantas tratadas con fertilizante hidrosoluble, independientemente de la presencia de hidrogel en el medio de crecimiento (**Figura 11a-A**). Como se indicó anteriormente, la mayor concentración de P en solución tiene un efecto positivo en la difusión del mismo, al tenerse un mayor gradiente electroquímico; caso contrario a lo observado con el fertilizante de lenta liberación, en el que se observa un efecto antagónico con el hidrogel.

En hojas verdes, se observan efectos negativos del tratamiento con hidrogel cuando se combinó con el fertilizante hidrosoluble o con el fertilizante de lenta liberación, dado que probablemente éste retiene dentro de su estructura a los nutrientes contenidos en la solución nutritiva suministrada (**Figura 11b-B**); sin embargo, en hojas senescentes, se presentó un

efecto sinérgico en la concentración de P al combinar el hidrogel con fertilizante hidrosoluble (**Figura 11c**).

Por otro lado, la interacción del hidrogel y fertilizante solo fue significativa en la concentración y contenido de K en raíces (**Figura 12**). En ambos casos, se observó un efecto antagónico al combinar el hidrogel con el fertilizante de lenta liberación, pero no con el fertilizante hidrosoluble.

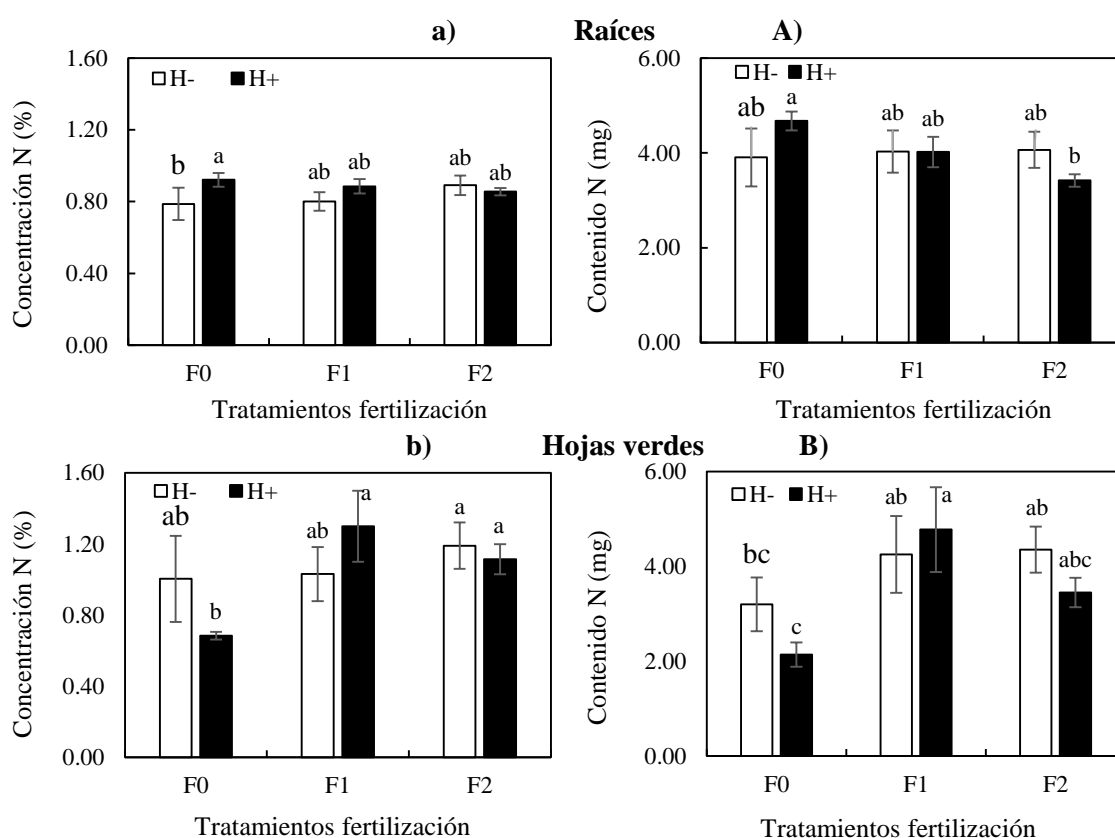


Figura 10. Efecto de la interacción del hidrogel (H) y del fertilizante (F) en la concentración y contenido de nitrógeno (N) en raíces (a, A) y hojas verdes (b, B) de plantas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*. H-=sin hidrogel; H+=con hidrogel; F0=sin fertilizante; F1=fertilizante hidrosoluble; F2=fertilizante de lenta liberación (Osmocote Plus®).

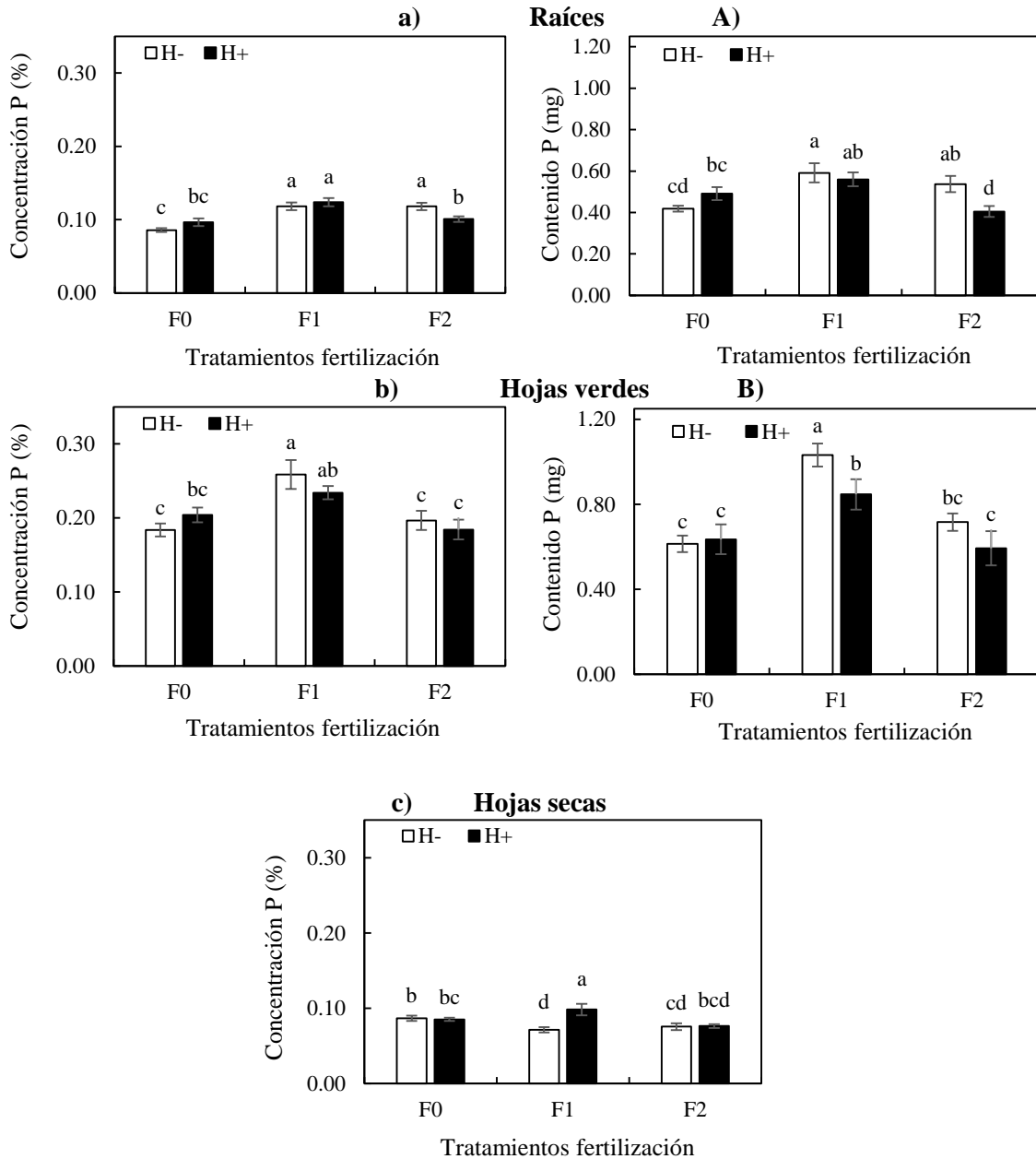


Figura 11. Efecto de la interacción del hidrogel (H) y del fertilizante (F) en la concentración y contenido de fósforo (P) en raíces (a, A), hojas verdes (b, B) y hojas secas (c) de plantas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*. H-=sin hidrogel; H+=con hidrogel; F0=sin fertilizante; F1=fertilizante hidrosoluble; F2=fertilizante de lenta liberación (Osmocote Plus®).

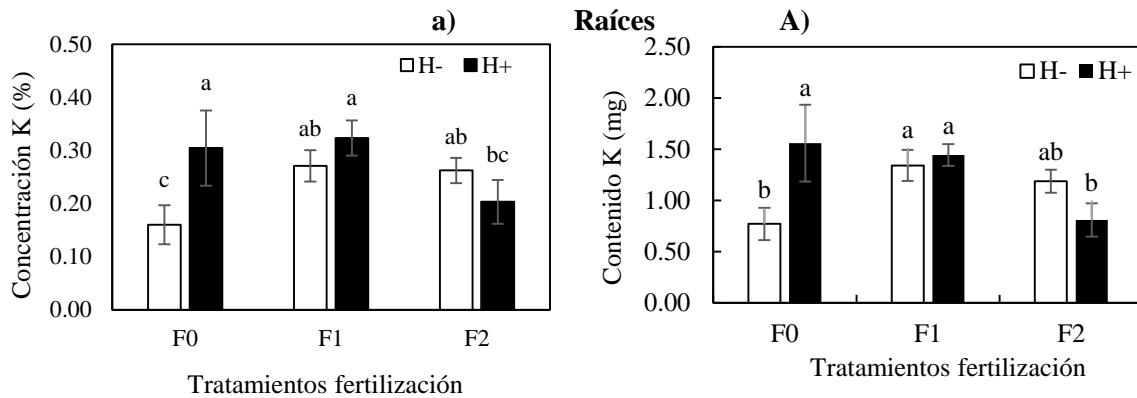


Figura 12. Efecto de la interacción del hidrogel (H) y del fertilizante (F) en la concentración y contenido de potasio (K) en raíces (a, A) de plantas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*. H-=sin hidrogel; H+=con hidrogel; F0=sin fertilizante; F1=fertilizante hidrosoluble; F2=fertilizante de lenta liberación (Osmocote Plus®).

A pesar de que el fertilizante de lenta liberación tuvo un efecto positivo en la acumulación total de N en la planta (**Figura 13a**), la adición de hidrogel en combinación con este fertilizante ocasionó un efecto antagónico o de interferencia (**Figura 13b**).

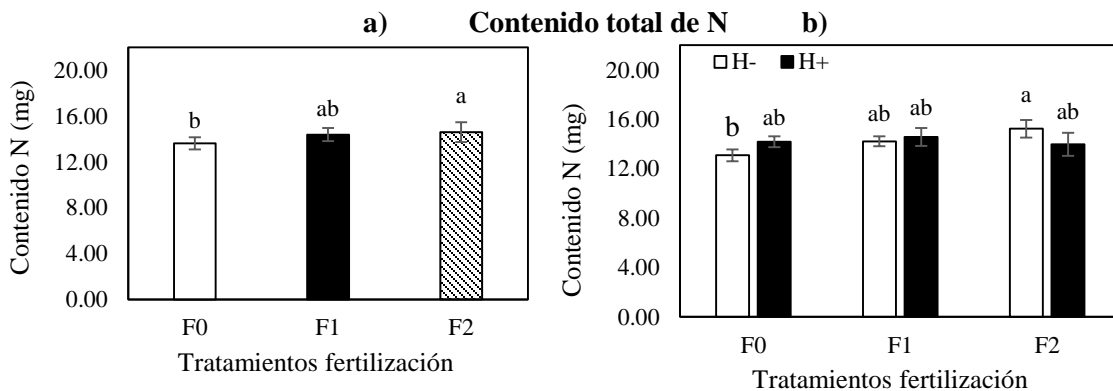


Figura 13. Efecto de la fuente de fertilización (a) y de la interacción del hidrogel (H) y el fertilizante (F) (b) en el contenido total de N de plantas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*. H-=sin hidrogel; H+=con hidrogel; F0=sin fertilizante; F1=fertilizante hidrosoluble; F2=fertilizante de lenta liberación (Osmocote Plus®).

Como se explicó previamente, el N es un nutriente que muestra alta susceptibilidad de ser lixiviado en el suelo o en el sustrato, por lo que su liberación gradual permite una mayor eficiencia en su absorción y asimilación. Sin embargo, la adición de hidrogel (H+) ocasiona efectos negativos en el contenido total de N cuando se utiliza este tipo de fertilizante debido, posiblemente a que el N liberado de manera gradual, es retenido por el hidrogel y por tanto, no se encuentra disponible para ser absorbido por las raíces.

De la misma manera que para el N, los efectos significativos en el contenido total de P fueron el factor fertilizante (F) y la interacción de hidrogel y fertilizante (H x F) (**Figura 14**). En este caso se observa un efecto positivo del fertilizante hidrosoluble (**Figura 14a**), dado que el P es un elemento que accesa a las raíces por difusión y además posee un coeficiente de difusión efectiva muy bajo. En este caso, el hidrogel no ocasiona una interferencia con el fertilizante hidrosoluble, pero si con el de liberación controlada (**Figura 14b**). Por otra parte, el contenido total de K solo fue afectado de manera significativa por el factor hidrogel (**Figura 15**), donde la presencia de éste (H+) tuvo un efecto positivo.

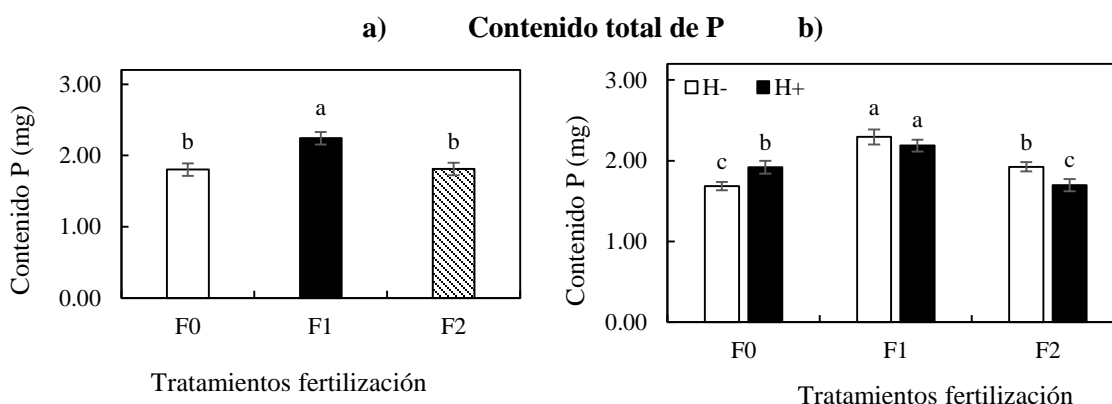


Figura 14. Efecto de la fuente de fertilización (a) y de la interacción del hidrogel (H) y el fertilizante (F) en el contenido total de P de plantas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*. H-=sin hidrogel; H+=con hidrogel; F0=sin fertilizante; F1=fertilizante hidrosoluble; F2=fertilizante de lenta liberación (Osmocote Plus®).

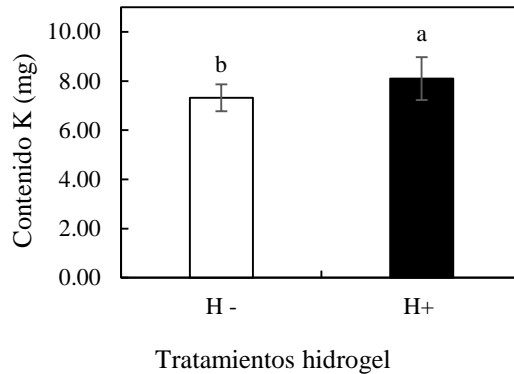


Figura 15. Efecto del factor hidrogel (H) en el contenido total de K de plantas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*. H-=sin hidrogel; H+=con hidrogel.

En general, los efectos encontrados de los factores respecto a las concentraciones y contenidos de nutrimentos, fueron de respuesta antagónica al mezclar el hidrogel con el fertilizante de lenta liberación. Por otro lado, al mezclarlos con el fertilizante soluble hubo un efecto de sinergia, en algunos casos, y sin efecto, en otros.

CONCLUSIONES

La aplicación de hidrogel, en el sustrato compuesto por corteza, ocasionó un ahorro de 16 % en el consumo de agua promedio por día, sin afectar negativamente el crecimiento en diámetro y la acumulación de biomasa en plantas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*, producidas en vivero. El fertilizante de lenta liberación aumentó el consumo de agua y afectó negativamente el crecimiento en diámetro y altura, así como la acumulación de biomasa, mientras que el fertilizante soluble no afectó el consumo de agua y favoreció el crecimiento en diámetro y altura, pero también redujo la acumulación de biomasa, especialmente en el tallo. Tanto el hidrogel como el tipo de fertilizante afectaron la concentración y contenido de nutrimentos, pero el efecto varió entre nutrientes y componentes de la planta. En los casos

donde hubo una interacción significativa entre el hidrogel y el tipo de fertilizante en la absorción de nutrientes, se manifestó en forma de antagonismo o interferencia con el fertilizante de liberación controlada y con efecto sinérgico o neutro con el fertilizante soluble. Los resultados indican que es posible utilizar el hidrogel para reducir el consumo de agua de las plantas y que en combinación con el fertilizante soluble puede ser un medio eficiente para la nutrición de P y K.

LITERATURA CITADA

- Alcántar, G. G., Trejo, T. L. I., y Gómez-Merino, F. C. (2016). Nutrición de cultivos. Segunda Edición. Colegio de Postgraduados. México. ISBN: 978-607-715-324-5
- Alcántar, G. G. y Sandoval, M. V. (1999). Manual de análisis químico de tejido vegetal. Guía de muestreo, preparación, análisis e interpretación. Publicación especial No. 10 de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A. C. Chapingo, México. 156 p.
- Ananías, R., Crisólogo, B., Martín, Á., Del, R., Abad, G., Cachique, D. y López, L. A. (2015). Absorción y concentración de nitrógeno, fósforo y potasio en sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L .) en suelos ácidos , San Martín , Perú. *Plant.* 24(2), 123-130. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.24841/fa.v24i2.68>
- Arriaga F. A., De la Cruz G. G. H., y Ortiz M. J. G. (2009). Relaciones Hídricas en las Plantas. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Iztacala. Tlalnepantla. Edo. De México. 123 p. ISBN: 978-607-02-0454-8
- Bremner, J. M. (1965). Total nitrogen. *In: Methods of Soil Analysis. Part 2. Agronomy 9.* Black C. A. (ed.). American Society of Agronomy. Madison, WI, USA. pp. 1149-1178.
- Brucker Kelling, M., Machado Araujo, M., Benítez León, E., Carpenedo Aimi, S., y Turchetto, F. (2017). Regímenes de riego y dosis de polímero hidrorretedor sobre características morfológicas y fisiológicas de plantas de *Cordia trichotoma*. *Bosque* (Valdivia), 38(1), 123–131. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002017000100013>

- Dorraji, S. S., Golchin, A., y Ahmadi, S. (2010). The effects of hydrophilic polymer and soil salinity on corn growth in sandy and loamy soils. *Clean - Soil, Air, Water*, 38(7), 584–591. <https://doi.org/10.1002/clen.201000017>
- El-Asmar, J., Jaafar, H., Bashour, I., Farran, M. T., y Saoud, I. P. (2017). Hydrogel banding improves plant growth, survival, and water use efficiency in two calcareous soils. *Clean - Soil, Air, Water*, 45(7), 1-9. <https://doi.org/10.1002/clen.201700251>
- Fernández, M. T. (2007). Fósforo: amigo o enemigo. *ICIDCA. Sobre Los Derivados de La Caña de Azúcar*, 41(2), 51–57. <https://doi.org/10.4270/ruc.2010216>
- Flores-Nieves, P., López-López, M. A., Ángeles-Pérez, G., Isla-Serrano, M. de L., Calva-Vázquez, G. (2011). Modelos para estimación y distribución de biomasa de *Abies religiosa* (Kunth) Schltld. et Cham. en proceso de declinación. *Rev. Mex. Cien. For.* 2(8), 9-20.
- Guilherme, M. R., Aouada, F. A., Fajardo, A. R., Martins, A. F., Paulino, A. T., Davi, M. F. T., y 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>
- Kottegoda, N., Sandaruwan, C., Priyadarshana, G., Siriwardhana, A., Rathnayake, U. A., Arachchige, D. M. B., Kumarasinghe, A.R., Dahanayake, D., Karunaratne, V. y Amaratunga, A. J. (2017). Urea-hydroxyapatite nanohybrids for slow release of nitrogen. *ACS Nano* 11 (2), 1214–1221
- Landis, T. D., Tinus, R. W., McDonald, S. E. y Barnett, J. P. (1989). Manual de Vivero para la Producción de Especies Forestales en Contenedor, Vol. 4 Fertilización y Riego. (Trad.) Trejo, D. A. R. Dirección General del Programa Nacional de Reforestación, Méx. 126 p.
- Li, Y., Sun, Y., Liao, S., Zou, G., Zhao, T., Chen, Y. y Zhang, L. (2017). Effects of two slow-release nitrogen fertilizers and irrigation on yield, quality, and water-fertilizer productivity of greenhouse tomato. *Agricultural Water Management*. 24(2), 139–146. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.02.006>
- Marschner, H. (2012). Mineral Nutrition of Higher Plants. Third edition. Academic Press. 651 p.
- Mota O., E. M., Ruiz, H. A., Alvarez V, V. H., Ferreira, P. A., Costa, F. O. y Almeida, I. C. C. (2010). Nutrient supply by mass flow and diffusion to maize plants in response to soil aggregate size

- and water potential. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo* 34(2), 317–328. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000200005>
- Navroski, M. C., Araujo, M. M., Fior, C. S., Da Silva Cunha, F., Berghetti, Á. L. P., y De Oliveira Pereira, M. (2015). Uso de hidrogel possibilita redução da irrigação e melhora o crescimento inicial de mudas de *Eucalyptus dunnii* Maiden. *Scientia Forestalis/Forest Sciences*. 43(106), 467-476 . <https://doi.org/10.5902/1980509825106>
- Orikiriza, L. J. B., Agaba, H., Eilu, G., Kabasa, J. D., Worbes, M., y Hüttermann, A. (2013). Effects of hydrogels on tree seedling performance in temperate soils before and after water stress. *Journal of Environmental Protection*, 04(07), 713–721. <https://doi.org/10.4236/jep.2013.47082>
- Pattanaaik, S. K., Wangchu, L., Singh, B., Hazarika, B. N., Singh, S. M., y Pandey, A. K. (2015). Effect of hydrogel on water and nutrient management of *Citrus reticulata*. *Research on Crops*, 16(1), 98–103. <https://doi.org/10.5958/2348-7542.2015.00015.7>
- Pedroza-Sandoval, A., Yáñez-Chávez, L. G., Sánchez-Cohen, I., y Samaniego-Gaxiola, J. A. (2015). Efecto del hidrogel y vermicomposta en la producción de maíz. *Rev. Fitotec. Mex.* 38 (4), 375-381.
- Pizarro, R. (2015). El agua sólida promete regar en épocas de sequía. *Red Agrícola Agua y Riego*, Edición 72, 68–70. Recuperado de https://www.redagricola.com/sites/default/files/el_agua_solid_a_promete_regar_en_epocas_de_sequia_1.pdf
- Rabat, N. E., Hashim, S., y Majid, R. A. (2016). Effect of different monomers on water retention properties of slow release fertilizer hydrogel. *Procedia Engineering*, 148, 201–207. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.573>
- Sandoval, A. P., Yáñez-Chávez, G. L., Sánchez-Cohen, I., Samaniego-Gaxiola, J. A., y Trejo-Calzada, R. (2017). Hydrogel, biocompost and its effect on photosynthetic activity and production of forage maize plants (*Zea mays* L.). *Acta Agronomica*, 66(1). <https://doi.org/10.15446/acag.v66n1.50868>
- Schachtman, D. P., Reid, R. J., y Ayling, S. M. (1998). Phosphorus uptake by plants: from soil to cell. *Plant Physiology*, 116(2), 447–453. <https://doi.org/10.1104/pp.116.2.447>

- Shen J, Yuan L, Zhang J, Li H, Bai Z, Chen X, Zhang W y Zhang F. (2011). Phosphorus dynamics: from soil to plant. *Plant Physiology* 156(3): 997-1005.
- Silber, A., Xu, G. y Levkovitch, I. (2003). High fertigation frequency: the effects on uptake of nutrients, water and plant growth. *Plant and Soil* 253(2), 467-477. <https://doi.org/10.1023/A:1024857814743>
- Valladares-Ros, F., Ruiz Robleto, J., Quero Pérez, J. L., Poorter, H., Valladares Ros, F., y Marañón, T. (2008). Ecología del bosque Mediterráneo en un mundo cambiante. Organismo Autónomo Parques Nacionales. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10261/47933>
- Viero, P. W. M., y Little, K. M. (2006). A comparison of different planting methods, including hydrogels, and their effect on eucalypt survival and initial growth in South Africa. *Southern African Forestry Journal*, 208(1), 5–13. <https://doi.org/10.2989/10295920609505256>
- Wang, M., Zheng, Q., Shen, Q. y Guo, S. (2013). The critical role of potassium in plant stress response. *Int. J. Mol. Sci.* 14(4): 7370-7390.

CAPÍTULO 2. EFECTO DE HIDROGEL (POLIACRILATOS DE POTASIO) Y FERTILIZANTE EN EL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL SUELO Y EL CRECIMIENTO DE PLANTAS DE *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*, EN CAMPO

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue evaluar el uso de poliacrilatos de potasio (hidrogel) en combinación con fertilizante de lenta liberación en el establecimiento y crecimiento inicial de plantas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*. El experimento se estableció en un predio de San Pedro Chiautzingo, Municipio de Tepetlaoxtoc, Estado de México. Se usaron plantas de 2 años de edad en cepas de 30 x 30 x 30 cm, a 2 x 2 m de espaciamiento. Se evaluó la combinación de hidrogel (H) y fertilizante (F) en un arreglo factorial 2 x 2 en un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones. Se determinó el contenido de humedad en el suelo a diferentes distancias de la planta durante el periodo de secas, así como la fenología de brotación de la yema y el alargamiento del brote terminal. Al final del periodo de evaluación se determinó la tasa relativa de crecimiento en diámetro y altura de las plantas. El hidrogel aumentó en 10-15 % la retención de humedad del suelo, sobre todo en los periodos de escasas de lluvia, aceleró la brotación de la yema y aumentó en 17 % la longitud del brote terminal, pero sin modificar la tasa relativa de crecimiento. El uso del fertilizante también aumentó la humedad del suelo, el alargamiento de la yema y la tasa relativa de crecimiento de las plantas. Con excepción de la brotación de la yema, no se encontró una interacción significativa entre los dos factores. Por lo anterior, la aplicación de hidrogel y de fertilizante de lenta liberación al momento de la plantación puede mejorar el establecimiento y crecimiento inicial de plantas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*.

Palabras Clave: *Pinus cembroides*, reforestación, fenología, tasa relativa de crecimiento.

CHAPTER 2
EFFECT OF HYDROGEL (POTASSIUM POLYACRYLATES) AND FERTILIZER
ON SOIL MOISTURE CONTENT AND PLANT GROWTH OF *Pinus cembroides*
subsp. *orizabensis*, IN FIELD.

ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate the use of potassium poly-acrylates (hydrogel) combined with controlled-release fertilizer in the establishment and initial growth of *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis* seedlings. The experiment was established in a farm in San Pedro Chiautzingo, Municipality of Tepetlaoxtoc, in the State of México. Two-year-old seedlings were planted in 30 x 30 x 30 cm pits, at 2 x 2 m spacing. Treatments of hydrogel (H) and fertilizer (F) combinations were evaluated in a 2 x 2 factorial arrangement in a randomized complete block experimental design, with three replications. Soil moisture content was determined at several distances from the seedlings during the dry season, as well as bud burst phenology and terminal shoot elongation. At the end of the dry season, the relative growth rate in stem diameter and height was also determined. Hydrogel increased 10-15 % soil moisture content, particularly during the rain-free season, accelerated bud burst and increased 17 % shoot length, but did not affect relative growth rate of seedlings. The fertilizer also increased soil moisture, shoot length and relative growth rate in diameter. No interaction was found between hydrogel and fertilizer, except for bud burst phenology. Considering this results, hydrogel and slow-release fertilizer application at the time of planting would improve establishment and initial growth *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis* seedlings.

Keywords: *Pinus cembroides*, plantation. hydrogel, fertilizer, growth.

INTRODUCCIÓN

Las poblaciones naturales de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis* han sido fuertemente afectadas por las actividades antrópicas. La recolecta de su semilla (piñón) para uso alimenticio, el pastoreo excesivo y los incendios inducidos, son las actividades más frecuentes que amenazan las poblaciones de esta especie, ocasionando daños a los bosques naturales. Estos factores provocan una disminución en la tasa de supervivencia, ya que los renuevos no lignificados y de bajo porte no soportan el estrés y daños físicos y mecánicos ocasionados por esas actividades (Granados-Victorino *et al.*, 2015; Sánchez-Tamayo *et al.*, 2005). Además del consumo de la semilla con fines comerciales, la falta de mejores prácticas de manejo y la incidencia de plagas y enfermedades colocan a esta subespecie en un riesgo constante, ocasionando la disminución del tamaño de las poblaciones naturales (Granados-Victorino *et al.*, 2015).

Debido a las condiciones precarias en las que esta especie se desarrolla, se han hecho diferentes esfuerzos por restaurar las áreas afectadas y evitar la reducción en tamaño de sus poblaciones aisladas. Como sugieren Oriquiriza *et al.* (2013), el sector forestal requiere de alternativas que orienten hacia un uso eficiente del agua y que contribuyan al establecimiento y crecimiento de plantas en los diferentes tipos de suelo. Bajo esta premisa es que la combinación de un retenedor de humedad o polímero súper-absorbente (PSA) y un fertilizante que mantenga disponibles y libere lentamente los nutrientes promete ser una alternativa útil para lograr el establecimiento de especies forestales en suelos donde existan condiciones limitativas de humedad y fertilidad (Rabat *et al.*, 2016)

La mayoría de las investigaciones relacionadas con el uso de polímeros súper-absorbentes (PSA) o hidrogeles están orientadas al uso de éstos en la producción agrícola; como retenedores de agua y como medio de lenta liberación de fertilizantes (Rabat *et al.*, 2016). Sin embargo, existen también algunas investigaciones relacionadas con especies forestales, en las que se han estudiado variables de crecimiento e índices de supervivencia como resultado de la aplicación de hidrogeles como medio de retención de agua en el suelo (Viero y Little 2006; Sarvaš *et al.*, 2007; Senna *et al.* 2015). Por ejemplo, Wei *et al.* (2016) utilizaron un hidrogel a base de ácido poli-aspártico y encontraron que la supervivencia de *Xanthoceras sorbifolia*, después de plantar, aumentó entre 8-12 % y la humedad en las hojas entre 4-16 % con el uso del polímero.

Sin embargo, no se tiene evidencia que en *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis* se haya realizado algún estudio que evalúe el efecto de algún PSA, solo o en combinación con algún fertilizante, en las condiciones de humedad en el suelo y en el establecimiento y crecimiento inicial de la planta en el sitio de plantación, con el propósito de disminuir las adversidades del sitio en el que esta especie se desarrolla. En este trabajo se tuvo como objetivo evaluar el uso de poliacrilatos de potasio de la marca comercial Lluvia Sólida®, como una alternativa para favorecer las condiciones de humedad en el suelo, el establecimiento y crecimiento inicial de plantas en terrenos degradados y con problemas de disponibilidad de humedad en el suelo. Los objetivos específicos del estudio fueron: a) evaluar la eficiencia de un polímero súper-absorbente (PSA), a base de poliacrilatos de potasio, en el contenido de humedad del suelo y el crecimiento de una plantación de *P. cembroides* subsp. *orizabensis* en condiciones limitantes de humedad del suelo, semejantes a las existentes en su área de distribución natural y b) evaluar el efecto de la aplicación de fertilizante de lenta liberación y de su interacción

con el hidrogel en el crecimiento de las plantas. Con este propósito, en el estudio se evaluó la dinámica espacial y temporal del contenido de humedad en el suelo, así como el desarrollo fenológico de la yema terminal y la tasa relativa de crecimiento en diámetro y altura de las plantas durante un periodo de seis meses después de la plantación en campo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación y condiciones del ensayo de campo

El experimento se realizó en un predio de 0.6 hectáreas, ubicado en el Ejido de San Pedro Chiautzingo, Municipio de Tepetlaoxtoc, Estado de México, en las coordenadas 19° 34' 14.8" N y 98° 45' 47.4"; a una altitud de 2,610 msnm. El experimento se estableció el 27 de septiembre de 2017, en el predio a cielo abierto. El lugar tiene un clima C(w1) (w)b(i)g; templado subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media (650 mm de precipitación media anual). Los suelos predominantes son Phaeozem, con una densidad aparente de 1.18 g cm⁻³, con textura franco-arcillosa (36.7 % arcillas, 25.9 % limos y 37.4 % arena). Las características químicas del suelo son: pH de 7; CE: 0.196 dS/m; materia orgánica: 4.45 %; N total: 0.44 %; P: 8.24 ppm; Ca: 15.37 cmol/kg; Mg: 10.63 cmol/kg; K: 0.59 cmol/kg; Na: 0.61 cmol/kg; B: 0.03 ppm; Cu: 3.25 ppm; Fe: 4.96 ppm; Mn: 10.24; y Zn: 0.96 ppm.

En el terreno se hicieron 192 cepas de 30 x 30 x 30 cm, con equidistancia de dos metros entre cada una. La tierra de los primeros 15 cm se separó para rellenar la cepa después de plantar. Se utilizaron 192 plantas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*, de 24 meses de edad, producidas en el vivero La Gloria, en la localidad Los Molinos, Municipio de Perote, Veracruz, con semilla colectada en la localidad de San Pedro, Municipio de Tepeyahualco, Puebla.

Diseño experimental y establecimiento del experimento

El ensayo se estableció con un arreglo factorial 2 x 2 en un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones. El factor 1 fue hidrogel (H), con dos niveles (sin (H-)) y con (H+) hidrogel), y el factor 2 fue fertilizante (F), con dos niveles (sin (F-) y con (F+); fertilizante), para un total de 4 tratamientos (H-F-, H-F+, H+F- y H+F+). Se utilizó el hidrogel Lluvia sólida®, a base de poliacrilatos de potasio y el fertilizante de lenta liberación Osmocote Plus® (NPK: 18-6-12) con periodo de liberación de 7-8 meses. Cada unidad experimental se constituyó de 16 plantas, colocadas en las cepas de 30 x 30 x 30 cm. Previo a la plantación, en el vivero, las plantas se agruparon por clases de altura para asignarse a los bloques distribuidos en el terreno (bloque 1: plantas de 26-30 cm; bloque 2: plantas de 31-35 cm; y bloque 3: plantas de 21-25 cm.), con el fin de homogeneizar el tamaño de las plantas dentro de cada bloque al asignar los tratamientos a cada unidad experimental. Doce horas antes de la plantación se hidrató el hidrogel con agua de la llave, para garantizar la máxima hidratación. Se utilizó un contenedor de 500 litros para abastecer los 288 litros de hidrogel saturado requeridos. Con el fin de hacer eficiente y precisa la aplicación del fertilizante, con una balanza de precisión se pesaron las dosis necesarias de 21 g de fertilizante y se colocaron en sobres de papel.

La plantación en campo se realizó de acuerdo con el diseño experimental. Se aplicaron 4 tratamientos. En los tratamientos con hidrogel (H+) se aplicaron 3 litros de hidrogel hidratado por planta y en los tratamientos con fertilizante (F+) se aplicó la dosis preparada (21 g) de Osmocote Plus®. En el caso del tratamiento H+F+, al momento de la plantación, se colocó la planta en el centro de la cepa y alrededor del cepellón se agregó el hidrogel y sobre éste se mezcló con el fertilizante. Una vez mezclados se procedió a llenar la cepa, utilizando primero

la tierra que se quitó de los primeros 15 cm. El tratamiento H-F+, siguió el mismo método de plantación que el anterior, solo se mezcló el fertilizante con 3 litros de tierra y se adicionaron a la cepa. En el caso del tratamiento H+F- el hidrogel se colocó alrededor del cepellón como en el caso de H+F+, pero sin agregar el fertilizante. En el tratamiento H-F- (control) se usó el mismo método de plantación, pero sin agregar hidrogel ni fertilizante, solo el suelo de la cepa. Dado que el área experimental se encuentra en un predio privado y colinda con zonas de pastoreo, se instaló un cercado con postes de madera y alambre de púas para excluir la entrada de animales como el ganado.

Evaluación del contenido humedad en el suelo

El contenido de humedad en el suelo se determinó con un medidor de humedad de suelo TDR 300 (Marca FieldScout®). Los datos se registraron en porcentaje volumétrico y posteriormente se transformaron a humedad gravimétrica con la ecuación $\theta_m = \frac{\theta_v}{\rho_b}$; dónde: θ_m = humedad gravimétrica θ_v =humedad volumétrica (%) y ρ_b = densidad aparente (1.18 g cm⁻³). Las mediciones se realizaron en dos plantas por unidad experimental a una profundidad de 20 cm durante 7 ocasiones en un periodo de seis meses a partir del 12 de diciembre de 2017 a junio de 2018. En cada ocasión, en el lado sur de cada planta se trazó una línea perpendicular a la pendiente y sobre ella se tomaron las mediciones a 5 cm, 10 cm, 20 cm y 30 cm de distancia de la cepa; las primeras dos mediciones se ubicaron dentro del espacio de la cepa y las otras dos fuera de ella.

Evaluación de la brotación de la yema y alargamiento del brote

Después de la plantación, mientras se hacían las primeras mediciones de humedad, se registró el estado fenológico de la yema. A partir del 16 de marzo de 2018 y hasta el 22 de junio de ese mismo año, en los días 75, 84, 91, 101, 108, 124 y 173 a partir del 1 de enero de 2018, se monitoreó la brotación de la yema y el alargamiento del brote terminal en todas las plantas de las parcelas. En cada fecha de observación se registró el estado de la yema de cada planta (brotada o no brotada) y la longitud del brote terminal en mm. Con los datos de brotación se determinó el número de plantas por parcela con yema brotada. En estas mismas fechas también se registró el número de plantas vivas y muertas por parcela, para determinar el porcentaje de supervivencia. Sin embargo, dado que en total solo murieron 14 plantas durante todo el ensayo (93 % de supervivencia) y no hubo diferencias significativas entre tratamientos, esta variable no se incluyó en los resultados.

Evaluación del crecimiento de las plantas

Dos meses después de la plantación, el 21 de noviembre de 2017, y posteriormente el 22 de junio de 2018 se midió el diámetro en la base del tallo y la altura total de la planta. El diámetro se midió con un vernier digital y la altura total con un flexómetro graduado en mm, en cada una de las plantas. Con estos datos se calculó la tasa relativa de crecimiento en diámetro (D) y altura (A) por planta, con la siguiente ecuación (Valladares-Ros *et al.*, 2008): $TRC = [\ln(P_2) - \ln(P_1)] / [(t_2 - t_1)]$, donde: TRC es la tasa relativa de crecimiento, P_1 y P_2 son los valores de las variables (D o A) al inicio y final, respectivamente, del periodo de evaluación, y $t_1 - t_2$ es la duración (en meses) del periodo de evaluación.

Análisis estadístico

Se utilizó el paquete estadístico Statistical Analysis System (SAS), versión 9.4 para realizar el análisis de los datos obtenidos en el ensayo de campo (humedad del suelo, desarrollo del brote terminal, crecimiento y supervivencia de las plantas). El contenido de humedad del suelo, la brotación de la yema y el alargamiento del brote se analizaron utilizando un modelo lineal de medidas repetidas con el procedimiento PROC MIXED y los valores promedio por parcela. Los factores hidrogel (H) y fertilizante (F) y su interacción se consideraron como efectos fijos, los bloques como efectos aleatorios y las distancias de la planta (humedad del suelo) y las fechas de evaluación (brotación de la yema y alargamiento del brote) como medidas repetidas dentro de los sujetos. Con el mismo procedimiento y un modelo lineal similar, pero sin incluir las medidas repetidas, se realizó el análisis de varianza para la tasa relativa de crecimiento (TRC) en diámetro y altura. Las variables evaluadas en porcentaje (brotación de la yema) se transformaron con la función “arco seno” previo al análisis estadístico. Posteriormente, los valores promedio por tratamiento, estimados por cuadrados mínimos, se transformaron nuevamente a las unidades originales en porcentaje.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Contenido de humedad del suelo

El contenido de humedad promedio en el suelo no fue afectado de manera significativa ($P=0.05$) por los factores hidrogel y fertilizante, de manera individual o por su interacción (**Cuadro 4**). Sin embargo, el análisis de varianza mostró que hubo diferencias marcadas en el contenido de humedad del suelo asociadas a la distancia de la planta, en todas las fechas evaluadas. Además, la interacción hidrogel x distancia (H x D) fue significativas en las

primeras cuatro fechas evaluadas (en los meses de diciembre a febrero) y la interacción fertilizante x distancia (F x D) también fue significativa en las mediciones de las fechas dos a la cuatro (**Cuadro 4**).

Cuadro 4. Resultados del análisis de varianza (valor de P) para el contenido de humedad del suelo (CH) por efecto de los factores hidrogel y fertilizante a diferentes distancias y en diferentes fechas de medición en una plantación de *Pinus cembroides* su subsp. *orizabensis*.

Fuente de variación	Fecha de evaluación del contenido de humedad del suelo					
	12-12-17	22-01-18	26-01-18	16-02-18	01-04-18	22-06-18
Hidrogel (H)	0.142	0.366	0.864	0.800	0.668	0.580
Fertilizante (F)	0.639	0.781	0.804	0.733	0.419	0.760
H x F	0.246	0.274	0.377	0.321	0.962	0.959
Distancia (D)	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
H x D	0.023	0.008	0.069	0.002	0.454	0.202
F x D	0.468	0.027	0.001	0.013	0.158	0.462
H x F x D	0.557	0.912	0.290	0.488	0.492	0.582

El contenido de humedad en el suelo (CH) aumentó gradualmente conforme aumentó la distancia de la planta durante todo el periodo de estudio (**Figura 16**), indicando un gradiente espacial de humedad asociado con el consumo de agua por parte de la planta. Sin embargo, el gradiente de humedad se modificó por el efecto del hidrogel, especialmente durante las primeras fechas de evaluación.

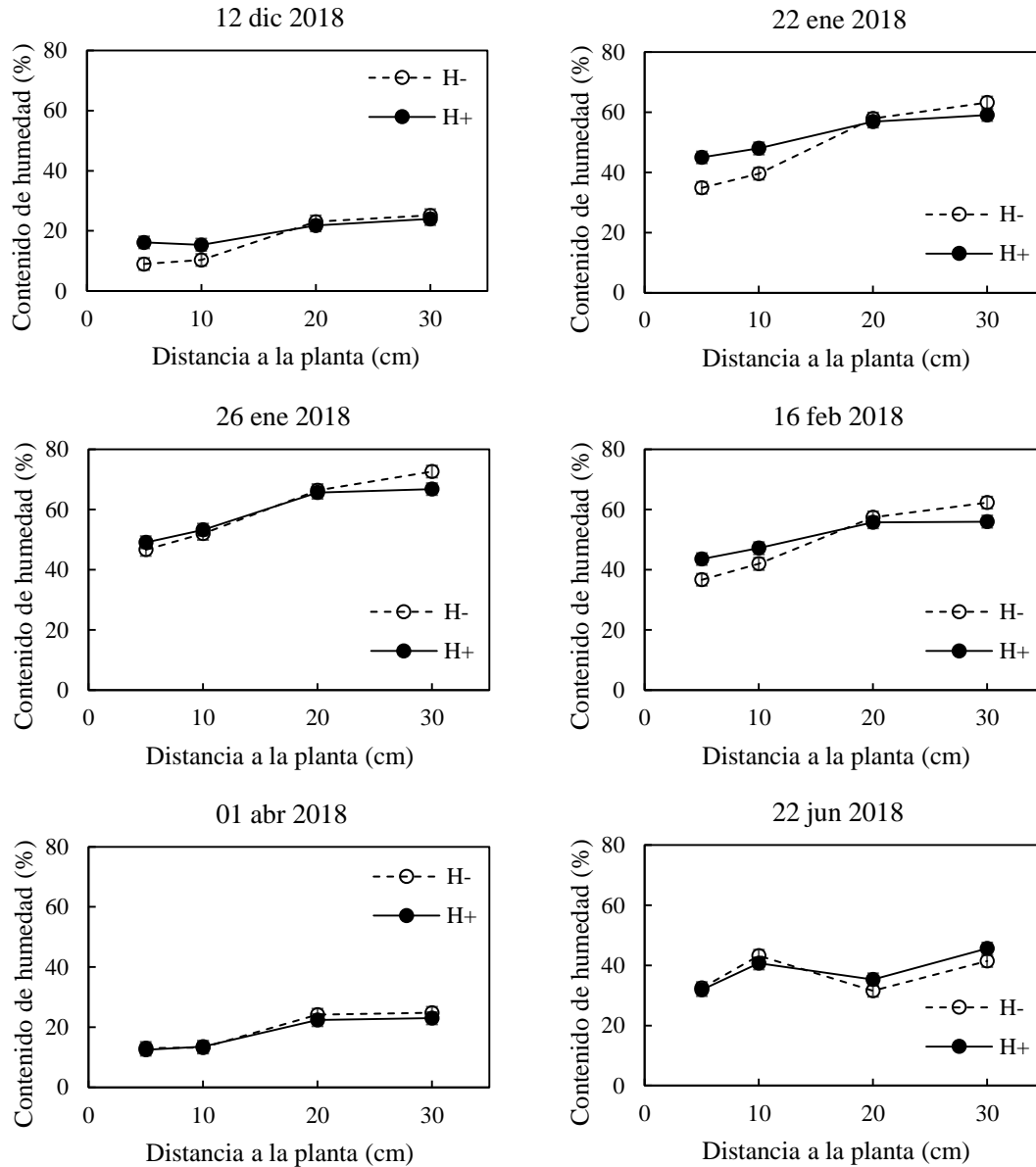


Figura 16 Contenido de humedad (%) del suelo a diferentes distancias de la planta y en diferentes fechas de medición durante la temporada de secas, en plantas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*, con (H+) y sin (H-) hidrogel en condiciones de campo.

En las cepas donde se agregó hidrogel (H+), se mantuvo un contenido de humedad 10-15 % mayor que en las cepas sin hidrogel (H-), pero fuera de la cepa (en las distancias de 20 y 30 cm) no hubo diferencias significativas entre los tratamientos de hidrogel (**Figura 16**); esto es consistente con lo que se reporta en la literatura, respecto a la capacidad de los polímeros

súper-absorbentes para retener agua y liberarla gradualmente, conforme la planta o las condiciones del suelo lo requieran (Fajardo *et al.*, 2013). Este efecto del hidrogel fue más notorio en los meses de diciembre, enero y febrero, a pesar del aumento de humedad ocasionado por lluvias esporádicas que ocurrieron antes del 22 de enero y que permitieron aumentar la humedad del suelo en más del doble con respecto a la humedad registrada en el mes anterior.

Sin embargo, el efecto del hidrogel en el contenido de humedad dentro de la cepa desapareció en los tres últimos meses de evaluación, de abril a junio, momento en que inició el periodo de lluvias y aumentó nuevamente la humedad del suelo en el sitio del ensayo. La pérdida de efecto del hidrogel coincide con lo reportado por Savi *et al.* (2014), al notar que después de 5 meses de haber establecido un techo verde con determinado sustrato el efecto positivo en el incremento de humedad en el sustrato se redujo considerablemente. Aunque el producto utilizado garantiza la permanencia y eficiencia del hidrogel en el suelo por un tiempo mayor a los 6 años, Guilherme *et al.*, (2015) mencionan que los polímeros al entrar en contacto con las sales del suelo, pierden la capacidad de retener agua en su estructura. Lo cierto es que si el tiempo de monitoreo pudiera ser mayor se garantizaría el efecto del hidrogel utilizado, lo cual sería una forma de tener más certeza de la duración real del efecto del hidrogel.

El efecto de la interacción fertilizante x distancia en el contenido de humedad del suelo fue similar al descrito en el párrafo anterior para el hidrogel (**Figura 17**). En el periodo de enero a febrero las plantas fertilizadas presentaron mayor contenido de humedad en el suelo dentro de la cepa que las plantas no fertilizadas, pero estas diferencias desaparecieron fuera de la cepa (en las distancias de 20 y 30 cm de la planta).

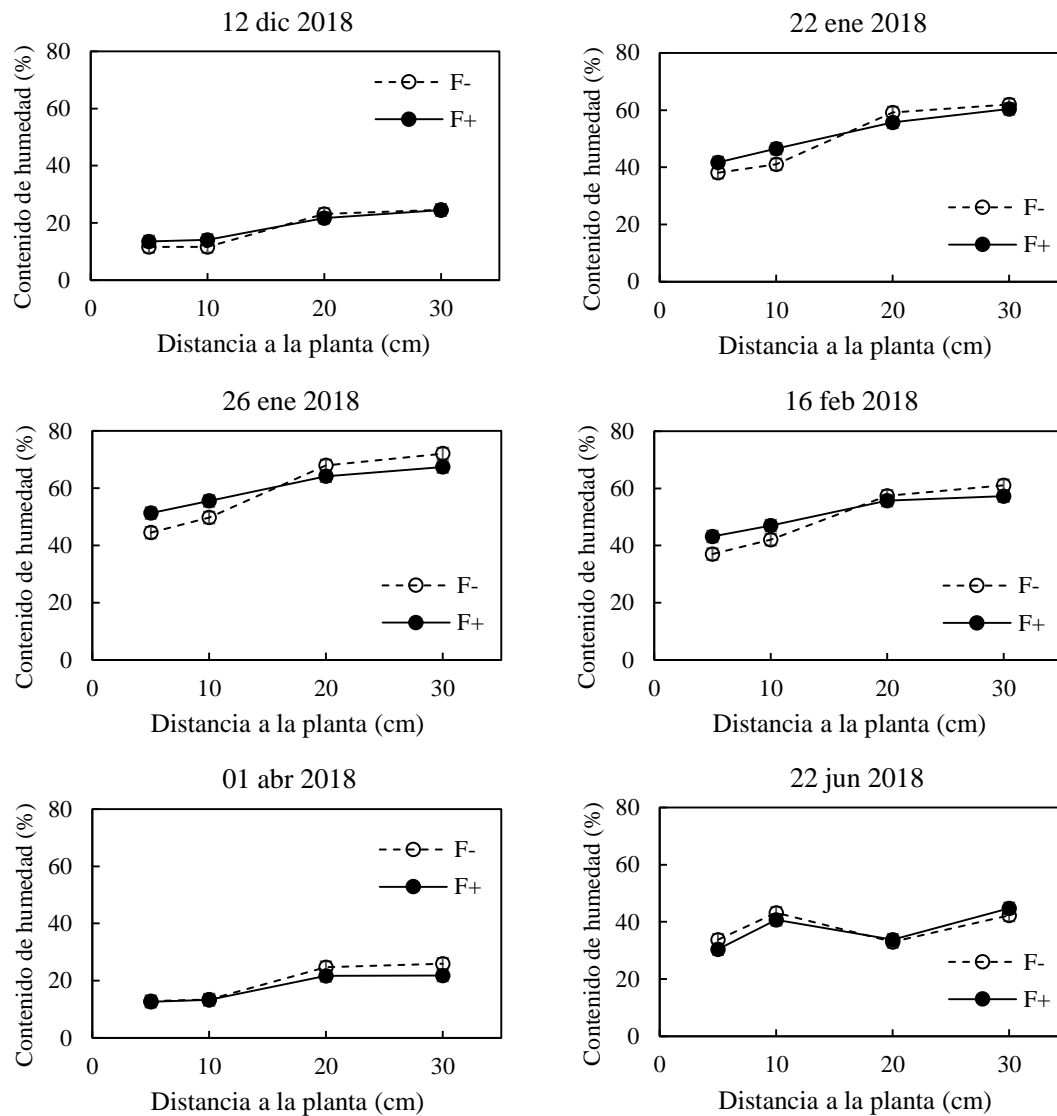


Figura 17. Contenido de humedad (%) del suelo a diferentes distancias de la planta y en diferentes fechas de medición durante la temporada de secas, en plantas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*, con (F+) y sin (F-) aplicación de fertilizante de libe lenta liberación en condiciones de campo.

El contenido de humedad del suelo en las plantas fertilizadas (F+) fue de 8 a 12 % mayor que en las no fertilizadas (F-) dentro de la cepa (a 5 y 10 cm de la planta) en ese periodo; sin embargo, en diciembre y en los meses de abril a junio no hubo diferencias en la humedad del suelo entre los tratamientos de fertilización (**Figura 17**). Esto puede deberse a la formación

de enlaces que se forman en la matriz del suelo por la concentración de minerales disueltos, generando enlaces iónicos con las partículas de agua que hacen posible una mayor retención de agua en la matriz del suelo (Guilherme *et al.*, 2015).

La variación en el contenido de humedad también se relaciona con los eventos de precipitación (Mudhanganyi, *et al.*, 2018). En general, durante el periodo de evaluación existieron diversos eventos de precipitación que no fue posible cuantificar, sin embargo de acuerdo con estimaciones del satélite TRMM_3B42RT de la NASA, estos eventos pudieron aportar alrededor de 270 mm, durante el periodo de evaluación. A pesar de que se estima que este periodo es el de menor lluvia durante el año, durante la evaluación, el contenido de humedad en el suelo, fuera de la cepa, se mantuvo cerca del 50%, durante los meses de enero, febrero y en junio, antes de la temporada de lluvias (**Figura 18**).

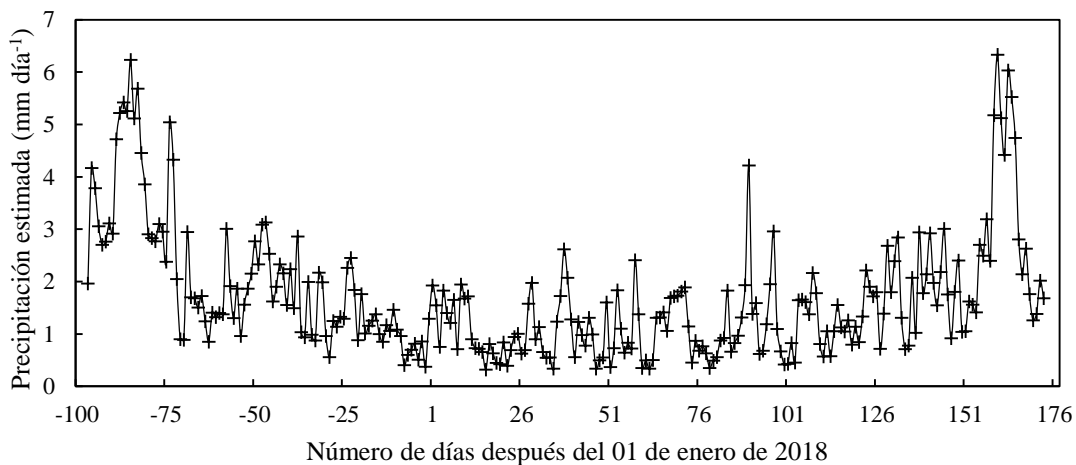


Figura 18. Tasa promedio de precipitación diaria (mm/día) durante el periodo de evaluación. Precipitación promedio próximo a tiempo real, por área (0.25 grados) en coordenadas 19.6250 N, -98.6250 LO; satélite TRMM_3B42RT de la NASA.

Brotación de la yema y crecimiento del brote terminal

El análisis de varianza del porcentaje de plantas con brotación de yema (BY) y la longitud del brote terminal (LB) mostró que el hidrogel (H) afectó de manera significativa los dos procesos, mientras que la adición de fertilizante solo afectó la longitud del brote (**Cuadro 5**). Sin embargo, a pesar de que el fertilizante no afectó de manera individual la brotación de la yema, en interacción con el hidrogel (H x F) sí mostró un efecto significativo.

Cuadro 5. Resultados del análisis de varianza (valor de P) para las características de brotación de la yema y la longitud del brote terminal por efecto de los factores hidrogel (H) y fertilizante (F) en diferentes fechas de medición (FE) en una plantación de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*.

Factor de variación	Brotación de la yema (BY)	Longitud del brote (LY)
Hidrogel (H)	0.0053	0.0031
Fertilizante (F)	0.6017	0.0202
H x F	0.0341	0.2986
Fecha de medición (FE)	<0.0001	<0.0001
H x FE	0.5199	0.9526
F x FE	0.9969	0.8311
H x F x FE	0.8375	0.9993

La fecha de evaluación (FE) también tuvo un efecto determinante en ambas variables, pero en ningún caso fue significativa la interacción de este factor con el hidrogel y/o el fertilizante. Esto indica que el efecto del hidrogel y del fertilizante en estas características de fenología y alargamiento del brote terminal fue similar a lo largo de todo el periodo de evaluación. El uso del hidrogel (H+) como retenedor de humedad del suelo aumentó 10 %, en promedio de todas las fechas de medición, el porcentaje de plantas con brotación de la yema en comparación con el testigo (H-) (**Figura 19a**).

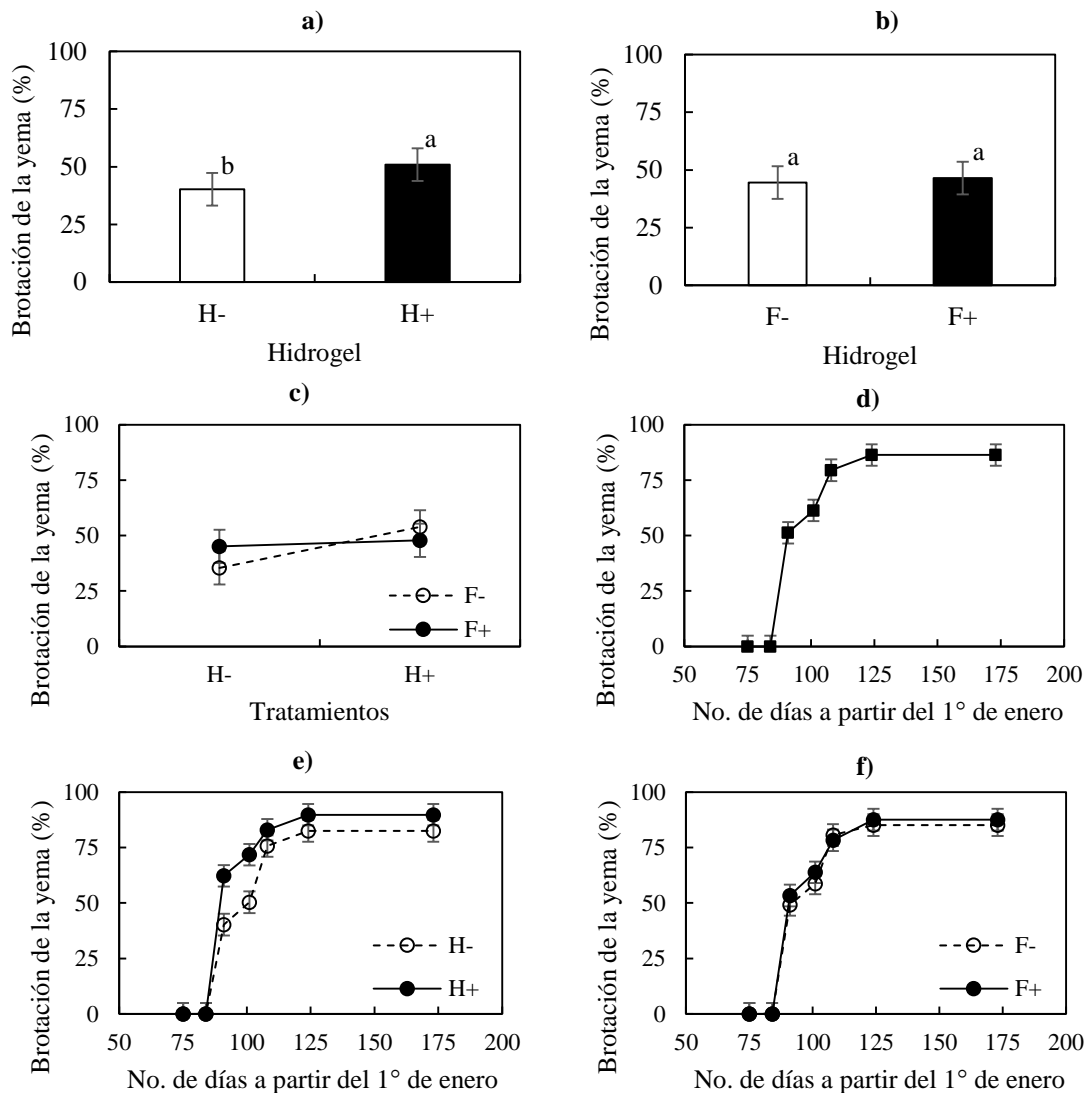


Figura 19. Porcentaje de plantas con brotación de yema por efecto de la aplicación de hidrogel (H) y fertilizante de lenta liberación (F) en diferentes fechas de evaluación en plantas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*, en condiciones de campo.

En el caso del fertilizante (F+) el porcentaje de brotación aumentó sólo 2 % en comparación del tratamiento F- (**Figura 19b**). La interacción de estos dos factores (H x F) indica que el efecto del hidrogel (H+) el efecto del Hidrogel (H+) en acelerar la brotación de la yema fue mayor cuando se utilizó sólo, sin el fertilizante (**Figura 19c**). De la misma manera, el efecto positivo del fertilizante en acelerar la brotación de la yema ocurrió cuando se aplicó en

ausencia del hidrogel, pero no cuando se aplicaron juntos los dos productos. En la **Figura 19d** se muestra la dinámica de brotación de la yema a lo largo del periodo de evaluación; la brotación inició después del día 84, con incrementos altos en los días siguientes, ya que en un periodo de 7 días alcanzó más de 50 %.

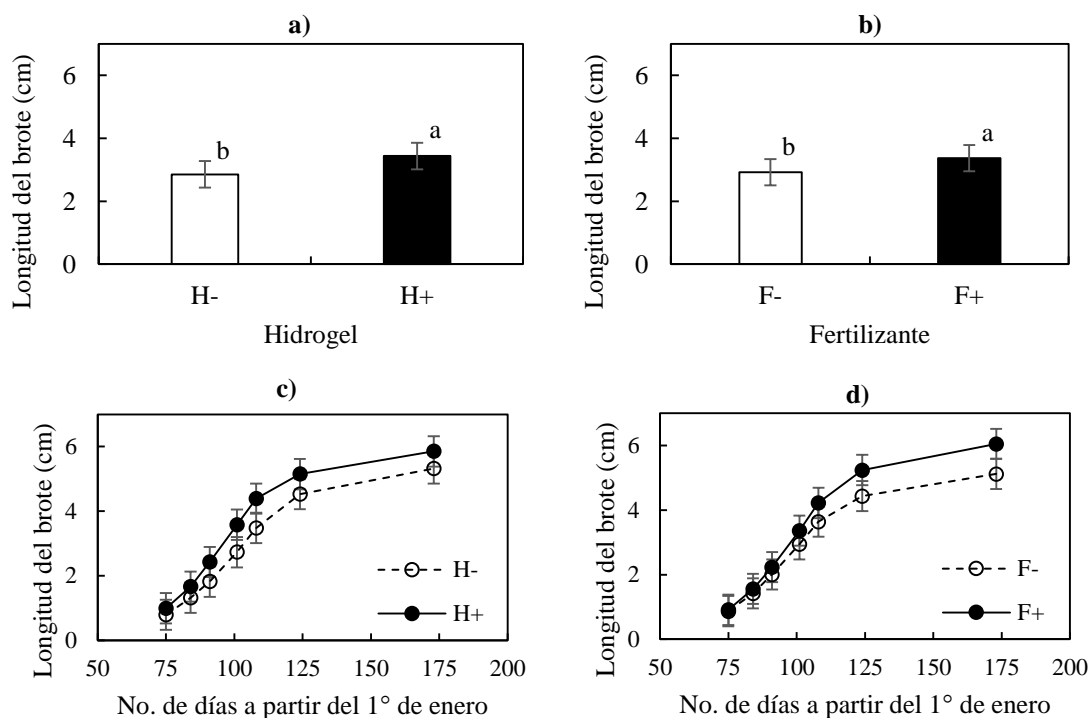


Figura 20. Alargamiento del brote por efecto de la aplicación de (a) hidrogel (H) y (b) fertilizante de lenta liberación (F), y dinámica de crecimiento del brote por efecto del (c) hidrogel y del (d) fertilizante en diferentes fechas de evaluación, en plantas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*, en condiciones de campo.

El porcentaje máximo de brotación (86.4 %) se alcanzó en el día 124 y posteriormente ya no hubo cambios. Esto es consistente con lo encontrado por Beniwal *et al.* (2011) en plantas de *Fagus sylvatica* sometidas a estrés hídrico en suelos modificados con hidrogel. Ellos encontraron que el porcentaje de brotación de la yema alcanzó más de 90%

independientemente de los tratamientos, pero en los tratamientos de suelo modificados con hidrogel se aceleró, con casi un mes de diferencia. El efecto del hidrogel (H+) y la falta de efecto del fertilizante (F+) fueron consistentes a lo largo de todo el periodo de evaluación (**Figura 19e y 19f**), lo que explica la falta de interacción de estos factores con la fecha de evaluación.

En lo que respecta a la longitud del brote, la aplicación de hidrogel (H+) ocasionó en promedio una longitud 17 % mayor en comparación con el testigo (H-) (**Figura 20a**) y la aplicación de fertilizante (F+) una longitud 13 % mayor con respecto al control (F-) (**Figura 20b**). De acuerdo con Beniwal *et al.* (2011), en el mismo trabajo con *Fagus sylvatica* encontraron que el alargamiento del brote aumentó de 21 % a 34% más en suelos modificados con hidrogel, en comparación con los testigos. Al analizar la dinámica de alargamiento del brote terminal durante el periodo de evaluación se observa que el efecto del hidrogel (**Figura 20c**) y del fertilizante (**Figura 20d**) fue consistente en todas las fechas de evaluación.

Crecimiento en diámetro y altura

A pesar del efecto en el alargamiento del brote terminal, el hidrogel (H) no tuvo ningún efecto significativo en la tasa relativa de crecimiento (TRC) en diámetro y altura (**Cuadro 6**). El fertilizante (F) sí tuvo un efecto significativo en la TRC en diámetro, pero no en la TRC en altura. Además, la interacción de estos factores tampoco fue significativa en ninguna de las TRC (**Cuadro 6**).

Cuadro 6. Resultados del análisis de varianza (valor de P) para las tasas relativas de crecimiento en diámetro (TRCD) y en altura (TRCA) por efecto de los factores hidrogel (H) y fertilizante (F) en plantas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*.

Factor de variación	TRCD	TRCA
Hidrogel (H)	0.2101	0.3604
Fertilizante (F)	0.0223	0.1847
H x F	0.7004	0.5035

A pesar de que las diferencias no fueron significativas, los datos obtenidos muestran que los valores medios estimados de TRCD y TRCA para las plantas con hidrogel son 11 % a 13 % más altos (**Figura 21a y 21c**) que en las plantas testigo, respectivamente. Es posible que se requiera un mayor tiempo de evaluación (o una muestra de mayor tamaño) para detectar diferencias significativas entre los tratamientos evaluados. En este sentido nuestros resultados coinciden con los encontrados por Mudhanganyi *et al.* (2018), al probar un hidrogel a base potasio en plantaciones de *Pinus patula* establecidas en diferentes épocas del año. En ese estudio encontraron un incremento en altura entre 15 % y 26 % en las plantas tratadas con hidrogel, pero su efecto en el crecimiento en diámetro sólo fue significativo en una de las épocas evaluadas. Los autores también señalan que el periodo de evaluación debe ampliarse para obtener resultados más precisos.

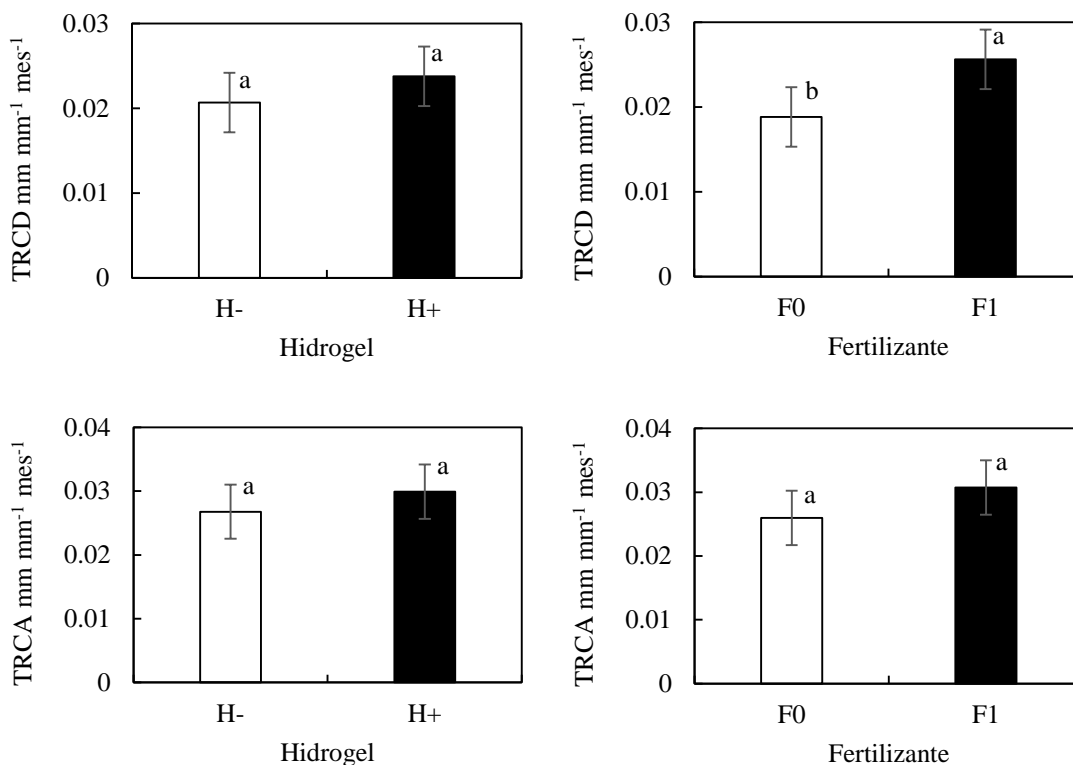


Figura 21. Tasa relativa de crecimiento en diámetro (TRCD) y altura (TRCA) por efecto la aplicación de hidrogel (H) (a, c) y fertilizante de lenta liberación (F) (b, d), en plantas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis* en condiciones de campo.

En el caso del fertilizante, el tratamiento F+ ocasionó un aumento significativo de 27 % en la TRCD con respecto al control (**Figura 21b**), y de 15 % en la TRCA, aunque en este caso no fue significativo (**Figura 21d**); estos incrementos ocasionados por el factor fertilizante pueden deberse a la humedad en el suelo debido al efecto de las lluvias, lo que promovió una mayor disponibilidad de nutrimentos y por consecuencia una mayor absorción de éstos, como lo demuestra Konzen *et al.* (2017) en el caso de plantas de *Mimosa scabrella* Benth. En general, nuestros resultados tienen una relación directa con los eventos de lluvia durante el periodo de evaluación, lo cual favoreció el establecimiento y crecimiento de las plantas. Debido a que no se presentaron condiciones de humedad extremadamente desfavorables durante el periodo de evaluación, la mortalidad de plantas fue relativamente baja (menos de

8 %) y sin diferencias significativas entre tratamientos, contrario a lo encontrado por Mudhanganyi *et al.* (2018) en *Pinus patula*. Sin embargo, el uso del hidrogel y del fertilizante de lenta liberación mostraron efectos positivos en la retención de humedad en el suelo y en el crecimiento del brote terminal durante los primeros seis meses de crecimiento en el sitio de plantación.

CONCLUSIONES

No se encontraron diferencias entre tratamientos en la supervivencia de las plantas, debido a que durante el periodo de evaluación hubo precipitación suficiente para evitar condiciones de humedad del suelo extremas y la mortalidad global fue menor de 8 %. Sin embargo, la aplicación de hidrogel aumentó el contenido de humedad dentro de la cepa en los primeros meses después de la plantación y aceleró la brotación de la yema y el alargamiento del brote terminal en las plantas. El fertilizante también aumentó la disponibilidad de agua en el suelo dentro de la cepa, aumentó la tasa relativa de crecimiento en diámetro y aceleró el alargamiento del brote terminal, aunque su efecto en la brotación de la yema fue mínimo. Es importante continuar la evaluación del efecto del hidrogel y del fertilizante por periodos de mayor duración, para tener una mayor precisión en el impacto de estos insumos en el proceso de restauración de poblaciones naturales en zonas con déficit de humedad como la de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*.

LITERATURA CITADA

Beniwal, R. S., Hooda, M. S., y Polle, A. (2011). Amelioration of planting stress by soil amendment with a hydrogel-mycorrhiza mixture for early establishment of beech

(*Fagus sylvatica* L.) seedlings. *Annals of Forest Science*, 68(4), 803–810.
<http://doi.org/10.1007/s13595-011-0077-z>

Centro de Servicios de Datos e Información de Ciencias de la Tierra Goddard (2016), TRMM (TMPA) Precipitación L3 1 día 0.25 grados x 0.25 grados V7, Editado por Andrey Savtchenko, Centro de Servicios de Datos e Información de Ciencias de la Tierra Goddard (GES DISC), Visitado el 30 enero de 2019, <http://dx.doi.org/10.5067/TRMM/TMPA/3H/7>

Fajardo, L., Rodríguez, J. P., González, V., y Briceño-Linares, J. M. (2013). Restoration of a degraded tropical dry forest in Macanao, Venezuela. *Journal of Arid Environments*, 88, 236–243. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2012.08.009>

Granados-Victorino, R. L., Granados-Sánchez, D., y Sánchez-González, A. (2015). Caracterización y ordenación de los bosques de pino piñonero (*Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*) de la Cuenca Oriental (Puebla, Tlaxcala y Veracruz). *Madera Bosques*, 21(2), 23–42.

Guilherme, M. R., Aouada, F. A., Fajardo, A. R., Martins, A. F., Paulino, A. T., Davi, M. F. T., y 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>

Konzen, E. R., Navroski, M. C., Friederichs, G., Ferrari, L. H., Pereira, M. de O., y Felipe, D. (2017). O uso de hidrogel combinado com substrato e fertilizante adequados melhoram a qualidade e crescimento de mudas de *Mimosa scabrella* benth. *Cerne*, 23(4), 473–482. <https://doi.org/10.1590/01047760201723042440>

Mudhanganyi, A., Ndagurwa, H. G. T., Maravanyika, C., y Mwase, R. (2018). The influence of hydrogel soil amendment on the survival and growth of newly transplanted *Pinus patula* seedlings. *Journal of Forestry Research*, 29(1), 103–109. <https://doi.org/10.1007/s11676-017-0428-1>

- Orikiriza, L. J. B., Agaba, H., Eilu, G., Kabasa, J. D., Worbes, M., y Hüttermann, A. (2013). Effects of hydrogels on tree seedling performance in temperate soils before and after water stress. *Journal of Environmental Protection*, 04(07), 713–721. <https://doi.org/10.4236/jep.2013.47082>
- Rabat, N. E., Hashim, S., y Majid, R. A. (2016). Effect of different monomers on water retention properties of slow release fertilizer hydrogel. *Procedia Engineering*, 148, 201–207. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.573>
- Sánchez Tamayo, V., De Lourdes, M., Pérez, N., Del, L., y Mendizábal-Hernández, C. (2005). Producción de semillas de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis* d.k. Bailey de Alzayanca, Tlaxcala, México. *Foresta Veracruzana*, 7(1), 15–20.
- Sarvaš, M., Pavlenda, P., y Takáčová, E. (2007). Effect of hydrogel application on survival and growth of pine seedlings in reclamations. *Journal of Forest Science*, 53(5), 204–209. <https://doi.org/10.17221/2178-JFS>
- Savi, T., Marin, M., Boldrin, D., Incerti, G., Andri, S., y Nardini, A. (2014). Green roofs for a drier world: Effects of hydrogel amendment on substrate and plant water status. *Science of the Total Environment*, 490, 467–476. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.05.020>
- Senna, A. M., Braga do Carmo, J., Santana da Silva, J. M., y Botaro, V. R. (2015). Synthesis, characterization and application of hydrogel derived from cellulose acetate as a substrate for slow-release NPK fertilizer and water retention in soil. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3(2), 996–1002. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.03.008>
- Valladares-Ros, F., Ruiz Robleto, J., Quero Pérez, J. L., Poorter, H., Valladares Ros, F., y Marañón, T. (2008). Ecología del bosque Mediterráneo en un mundo cambiante. Organismo Autónomo Parques Nacionales. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10261/47933>

Viero, P. W. M., y Little, K. M. (2006). A comparison of different planting methods, including hydrogels, and their effect on eucalypt survival and initial growth in South Africa. *Southern African Forestry Journal*, 208(1), 5–13. <https://doi.org/10.2989/10295920609505256>

Wei, J., Yang, H., Cao, H., y Tan, T. (2016). Using polyaspartic acid hydro-gel as water retaining agent and its effect on plants under drought stress. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 23(5), 654–659. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2015.08.016>

CONCLUSIONES GENERALES

El consumo de agua durante el proceso de producción de planta en viveros forestales, así como el impacto económico y ambiental derivado de un uso excesivo e inadecuado de los fertilizantes, requieren de investigaciones que vayan más allá de buscar el ahorro económico y se dirijan, también, a buscar el menor impacto ambiental. El agua utilizada en el proceso de producción, casi siempre, es más de la necesaria y los lixiviados del suelo o sustrato utilizado, la mayoría de las veces, termina contaminando el suelo. Por otra parte, las actividades de los programas de reforestación, que a menudo se realizan para recuperar poblaciones naturales afectadas por las actividades humanas, se limitan casi exclusivamente a la acción de plantar. Generalmente se deja la planta sin ningún mantenimiento posterior, sin considerar sus necesidades en campo después del establecimiento, lo cual limita el éxito de la misma. La disponibilidad de agua y la adición de fertilizantes pueden ser aspectos determinantes para su exitoso establecimiento y para garantizar la supervivencia. Por ello es importante seguir investigando sobre alternativas que coadyuven a resolver estas problemáticas, principalmente con especies de importancia ecológica en ambientes semiáridos como es el caso de *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*.

Los resultados encontrados en este trabajo son favorables para atender la problemática señalada. Los datos obtenidos sugieren que el hidrogel utilizado en producción de planta en vivero genera un ahorro importante en el consumo de agua y, en combinación con fertilizantes solubles, retenidos en su estructura, puede favorecer el crecimiento y la nutrición de las plantas en vivero. Sin embargo, el uso del hidrogel en combinación con fertilizantes de liberación prolongada ocasiona efectos antagónicos o de interferencia que aumentan el consumo de agua y afectan negativamente la nutrición y el crecimiento de las plantas, por lo

que no es deseable el uso simultáneo de ambos productos en el proceso de producción de planta en contenedor.

En condiciones de campo, la aplicación de hidrogel hidratado en la cepa, al momento de la plantación, tuvo efectos positivos al mantener un mayor contenido de humedad en el suelo (dentro de la cepa) durante los periodos más secos. Además, aceleró la brotación de la yema apical y mantuvo un porcentaje mayor de brotación durante todo el periodo de evaluación, ocasionando un mayor alargamiento del brote terminal. Por otro lado, la aplicación de fertilizante de liberación prolongada, de manera individual, también causó un efecto similar al del hidrogel, pero de menor magnitud y significancia en algunas de las variables evaluadas. A diferencia de lo ocurrido en vivero, en condiciones de campo no se encontraron efectos antagónicos o de interferencia, como resultado de la interacción entre el hidrogel y el fertilizante de liberación prolongada.

Los resultados del estudio sugieren que el uso del hidrogel y del fertilizante hidrosoluble tiene efectos positivos, que proporciona alternativas adecuadas para mejorar la gestión del agua y fertilizantes en la producción de planta en vivero. De la misma manera, el uso del hidrogel y el fertilizante de liberación prolongada permiten atender las necesidades de las plantas en campo, después de su establecimiento. Otro punto importante, a considerar en investigaciones futuras, es continuar la evaluación de los efectos de estos productos en las plantaciones por periodos de tiempo más largos, para tener una idea más precisa del efecto a largo de estos insumos en el establecimiento y crecimiento de las plantas en sitios que presentan condiciones ambientales desfavorables.