

USO EFICIENTE DEL AGUA DE RIEGO POR GRAVEDAD UTILIZANDO YESO Y POLIACRILAMIDA

Water Use Efficiency in Furrow Irrigation with Application of Gypsum and Polyacrylamide

Carlos Chávez^{1‡}, Carlos Fuentes¹ y Eusebio Ventura Ramos¹

RESUMEN

Los sistemas de riego por gravedad presentan baja eficiencia en su aplicación, que se traduce en una mayor cantidad de agua para satisfacer la demanda hídrica del cultivo. El uso de acondicionadores como la poliacrilamida (PAM) y el yeso aplicados al suelo ayudan a reducir significativamente la cantidad de agua utilizada, debido a que modifican la estructura de la capa superficial del suelo, reducen la pérdida de agua por evaporación y ayudan a que el agua sea mejor aprovechada por las plantas. En el presente estudio se evaluó el uso eficiente del agua en riego por gravedad en dos parcelas tipo ecuación universal de pérdida de suelo; USLE, usando como referencia *Avena sativa* a una dosis de siembra de 120 kg ha⁻¹. La primera parcela fue de control, mientras que en la segunda se aplicó 20 kg ha⁻¹ de PAM y 5 Mg ha⁻¹ de sulfato de calcio di-hidratado. Se midió en todo el periodo vegetativo la humedad volumétrica del suelo, la altura y lecturas SPAD de las plantas en ambas parcelas. Los riegos se aplicaron cuando se tenía una humedad aprovechable del 35% en el suelo, sumando un total de cuatro en la parcela con tratamiento y cinco en la parcela control, así, se redujo en 10 cm la lámina calculada, lo que implica un ahorro del 20% del volumen total. El rendimiento de materia seca obtenido en la parcela con tratamiento fue de 20.95 Mg ha⁻¹, que representa 5.54 Mg ha⁻¹ más que lo obtenido en la parcela control, además de lograr una eficiencia de producción de 6.49 kg m⁻³ de agua, que representa un aumento de 1.72 kg m⁻³ de agua utilizado con respecto a la parcela control.

Palabras clave: *acondicionadores de suelo, suelo, Avena sativa, riego en surcos, rendimiento.*

¹ Universidad Autónoma de Querétaro. Facultad de Ingeniería. Cerro de las Campanas s/n. 76010 Querétaro, Querétaro, México.

[‡] Autor responsable (chagcarlos@gmail.com)

SUMMARY

Furrow irrigation systems show low efficiency in their application. This can be translated as a greater amount of water necessary to satisfy the crop demand. The use of conditioners such as polyacrylamide (PAM) and gypsum in the soil significantly reduce water consumption, because they modify the structure of the top soil layer decreasing water loss through evaporation and allowing better absorption of water by plants. This paper evaluates water use efficiency of furrow irrigation in two typical plots using the universal soil loss equation (USLE). The plots were planted with *Avena sativa* at a rate of 120 kg ha⁻¹. In the first control plot nothing was applied, while in the second 20 kg ha⁻¹ of PAM and 5 Mg ha⁻¹ of calcium sulfate dihydrate were applied. Volumetric moisture content of soil, height and SPAD readings plants were measured. Irrigation was applied in each plot when soil reached 35% available water, for a total of four in the treated plot and five in the control plot, reducing the calculated laminar flow by 10 cm: a savings of 20% of the total volume. Dry matter yield in the treated plot was 20.95 Mg ha⁻¹, 5.54 Mg ha⁻¹ more than in the control plot. Crop production water efficiency in the treated plot was 6.49 kg m⁻³, which is 1.72 kg m⁻³ higher than the control plot.

Index words: *conditioners of ground, ground, Avena sativa, furrow irrigation, yield.*

INTRODUCCIÓN

La agricultura en México utiliza anualmente cerca del 77% del total de agua disponible en el país. La mayoría de los agricultores que hacen uso de ella operan con sistemas de riego por gravedad cuyas eficiencias de aplicación a nivel parcelario son menores al 50% (CONAGUA, 2010). Esto reduce la superficie regada, además de incrementar la explotación de los acuíferos ante la demanda del vital líquido. La reducción de la superficie regada se relaciona con la baja

disponibilidad de volúmenes de agua captados durante el temporal. El problema radica en que en la mayoría de los sistemas de riego se desperdicia agua.

Algunos estudios realizados por la CONAGUA (2010) han estimado que sólo de 15 a 50% del agua extraída para la agricultura de riego llega a la zona de cultivos. La mayor parte se pierde durante la conducción o por evaporación antes que sea aprovechada por las plantas. Si bien, parte del agua perdida en los sistemas de riego ineficientes retorna a las corrientes de agua o acuíferos, de donde puede volver a extraerse, su calidad se degrada por contaminantes como plaguicidas, fertilizantes y sales que se lixivian por el suelo.

En la actualidad se está intentando incrementar la eficiencia del agua mediante técnicas de riego más sofisticadas tales como los riegos presurizados (Barrios-Díaz *et al.*, 2006), para ahorrar agua y proteger los suelos esto a través de programas de tecnificación. Sin embargo, su alcance ha sido limitado y en muchos casos sólo se ha iniciado el uso de tubería de PVC para la conducción, sin tecnificar la forma de su aplicación. Las limitaciones de esta tecnificación se deben a factores como la falta de capacitación a usuarios, la escasez de infraestructura y falta de recursos, entre otros (Palacios *et al.*, 2002). No obstante, la necesidad de producir más alimentos requiere de un mejor aprovechamiento de los escasos recursos hídricos, obligando a los investigadores a buscar alternativas de mejoramiento de los sistemas más ampliamente utilizados (riego por gravedad), entre ellos el riego en surcos (FAO, 1988).

Parte de la baja eficiencia en el uso del agua por estos sistemas de riego (gravedad con flujo concentrado) está asociada con el sellamiento superficial (Yu *et al.*, 2003). La formación de este sellamiento superficial es el resultado de dos mecanismos complementarios: (i) la desintegración física de los agregados superficiales del suelo; y (ii) la dispersión fisicoquímica de las arcillas del suelo (Agassi *et al.*, 1981). Las arcillas son arrastradas por el agua infiltrada bloqueando los poros debajo de la superficie, y forman una capa de permeabilidad baja, llamada "zona de lavado" (Yu *et al.*, 2003). Para reducir parte del problema se han estudiado compuestos químicos como la poliacrilamida (PAM) en combinación con el yeso (Cochrane *et al.*, 2005).

La poliacrilamida es un polímero soluble en agua con la capacidad de incrementar la estabilización del suelo (Green *et al.*, 2000; Shrestha *et al.*, 2006). Se agrupa en una clase de compuestos formados por la polimerización de la acrilamida (Lentz *et al.*, 2001),

el peso molecular va de algunos mg mol^{-1} a 20 g mol^{-1} (Lentz *et al.*, 2002; Lentz, 2003), siendo los polímeros aniónicos de alto peso molecular ($10\text{-}20 \text{ mg mol}^{-1}$) los que actualmente se usan en investigación como acondicionadores (Leib *et al.*, 2005). La aplicación de PAM aniónica se ha usado para el acondicionamiento de los suelos y disminución de la evaporación de los mismo para ahorrar agua desde 1950 (Green *et al.*, 2000); sin embargo, la expansión de su uso no fue sino a partir de 1990 (Green y Stott, 2001).

La aplicación de yeso mejora las características físicas de los suelos, substituyendo Na^+ por Ca^{2+} en los coloides del suelo. El suelo saturado con Ca^{2+} es más estable y más permeable que el suelo con mayor saturación de Na^+ (Yu *et al.*, 2003). La aplicación de yeso sobre la superficie del terreno ayuda a mejorar la aieración y la penetración del agua en el suelo (Ventura y Norton, 2000), reduce la dispersión de arcillas y el sellamiento superficial; mejora la permeabilidad de los suelos arcillosos; estimula la actividad microbiana en el suelo; incrementa la estabilidad de la materia orgánica del suelo; e incrementa la disponibilidad de varios nutrientes (Cochrane *et al.*, 2005), además de hacer más eficiente el agua de irrigación de baja calidad y disminuir la toxicidad de metales pesados (Norton *et al.*, 1993).

Leib *et al.* (2005) encontraron que la PAM disuelta en el agua de riego en dosis de 10 kg ha^{-1} ayuda a mejorar la infiltración del agua y a mejorar notablemente la distribución del riego en el surco. Green *et al.* (2000) reportan que los frentes de humedecimiento son más amplios en los surcos tratados con PAM en comparación de los no tratados. El uso de la PAM en dosis de 20 kg ha^{-1} aumenta la infiltración al doble en suelos susceptibles a la erosión, especialmente con la presencia de electrólitos (Leib *et al.*, 2005) y disminuye la erosión hasta en un 93% en los surcos de riego (Chávez *et al.*, 2009). Bjorneberg *et al.* (2003) y Ajwa y Trout (2006) encontraron que la adición de la PAM en dosis de 20 kg ha^{-1} incrementó la infiltración final y acumulada de 7 a 8 veces mayor en comparación con el control, concluyendo que la eficacia de la PAM depende del tipo y densidad de carga así como del peso molecular. El uso de la PAM no es tóxico en el suelo, ya que se degrada con la luz solar (Green *et al.*, 2000).

Con los resultados descritos anteriormente, notamos que para obtener una mayor eficiencia en el uso del agua (EUA) y aumentar el rendimiento del cultivo, es necesario manejar la tensión de humedad del suelo. Los bajos rendimientos que se están obteniendo

en las cosechas pueden ser causados por una mala optimización de la tensión de humedad en el riego por gravedad. Esto significa que no hay un control adecuado en el suministro de agua a la zona radicular, provocando pérdidas por percolación y la disminución de la EUA. La PAM representa una solución inmediata a estos problemas, por todas las ventajas y beneficios que ofrece con relación a sistemas más eficientes. De esta manera, el presente trabajo tuvo como objetivo evaluar la utilización de yeso y poliacrilamida como una herramienta para hacer más eficiente el riego por gravedad.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó en el módulo hidrológico de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), localizado en las coordenadas 20° 35' 23.16" LN y 100° 24' 43.92" LO. El clima es del tipo templado semiseco, caracterizado por un verano cálido. La temperatura media anual es de 18 °C. Los meses más calurosos son mayo y junio; alcanzando temperaturas máximas de 36 °C, en tanto que los más fríos son los meses de diciembre y enero, en los que se registran temperaturas mínimas de -3 °C. La precipitación pluvial media anual es de 555 mm. Los vientos predominantes son del Noroeste, Sur y Suroeste (García, 1988).

El cultivo de referencia fue la *Avena sativa*, la cual, se sembró en parcelas de 5 m de longitud, 2 m de ancho y pendiente de 6% (utilizadas para obtener la ecuación universal de pérdida de suelo). Se utilizaron 2 tratamientos, uno de control y el otro en el que se aplicó yeso (CaSO_4) y PAM. El suelo usado para la presente investigación según la clasificación FAO (FAO-UNESCO, 1988) es Vertisol, con pH ligeramente alcalino (8.0) y pobre en materia orgánica (1.59%). La preparación del terreno consistió en un barbecho a una profundidad de 15 cm y la nivelación. La avena se sembró a una densidad de 120 kg ha⁻¹ con 15 cm de espaciamiento entre surcos. En la parcela tratada se aplicó sulfato de calcio di-hidratado a una dosis de 5 Mg ha⁻¹ (Cochrane *et al.*, 2005) y PAM a una dosis de 20 kg ha⁻¹ (Yu *et al.*, 2003), mismos que fueron aplicados superficialmente al término de la siembra por voleo. El método de riego utilizado fue riego por gravedad por compuertas. Con la finalidad de monitorear el contenido de humedad volumétrico en el suelo se instalaron 3 sensores WaterMark previamente calibrados en cada una de las parcelas, permitiendo abatimientos

aproximados al 35% de la humedad aprovechable para evitar problemas en el crecimiento del cultivo (Amado *et al.*, 2000). Las necesidades de riego en el cultivo fueron calculadas con el programa CropWat 4 para Windows versión 4.3 (Clarke, 1998).

La altura de las plantas y el color de las hojas fueron medidos cada 7 y 15 días, respectivamente. La altura se midió en 10 plantas escogidas aleatoriamente en cada una de las parcelas, mientras que el color de las hojas se midió en 30 plantas también escogidas aleatoriamente utilizando el SPAD-502. El SPAD-502 determina la intensidad del color verde, midiendo la absorbancia en dos regiones de longitud de onda (rojo y cerca del infrarrojo). Con estas dos transmitancias, el SPAD calcula un valor numérico que es proporcional a la concentración de clorofila en la planta (Minolta Camera Co. Ltd., 1989).

El rendimiento del cultivo en materia seca fue medido en surcos individuales y llevados a Mg ha⁻¹. Cada surco fue tomado como una repetición del experimento. El cálculo de la eficiencia del uso del agua se realizó con la relación de materia seca total/volumen de agua utilizado. Finalmente, se realizó una prueba de hipótesis utilizando la distribución t de Student para comparar si existían diferencias significativas entre la parcela control y la parcela con tratamiento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Rendimiento Total

Los patrones de crecimiento del cultivo se muestran en la Figura 1, donde al término de la cosecha se observó una mayor altura en las plantas de la parcela tratada con yeso y PAM. La altura promedio total alcanzada por las plantas en la parcela con tratamiento fue de 67.5 cm, 5.2 cm más que en las plantas sembradas en la parcela control, con una desviación estándar promedio de 0.237 cm. Aunado a esto, se observó que las plantas sembradas en la parcela con tratamiento desarrollaron mayor follaje y acumulación de granos que las plantas sembradas en la parcela control. Lo anterior, representó un rendimiento promedio de materia seca de 20.95 Mg ha⁻¹ en la parcela tratada con yeso y PAM comparada con los 15.41 Mg ha⁻¹ obtenidas en la parcela control. Es decir, hubo una ganancia de materia seca de 5.54 Mg ha⁻¹, o bien 35% de rendimiento de materia del cultivo. El rendimiento promedio por surco difiere significativamente en la parcela tratada con yeso y PAM

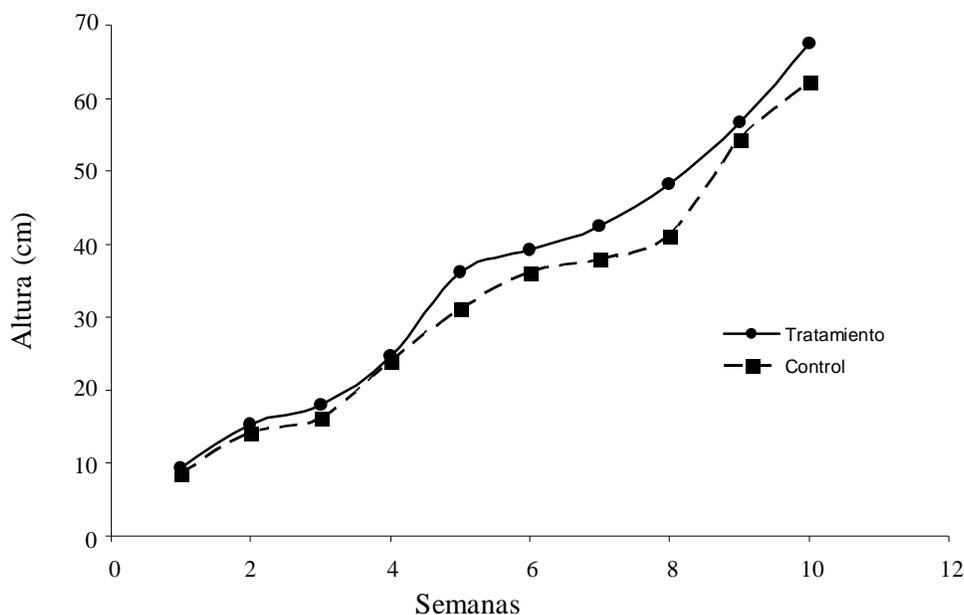


Figura 1. Curva de crecimiento de *Avena sativa* L.

de la parcela de control ($P < 0.001$), presentando mayores rendimientos la parcela con tratamiento.

La baja tensión de humedad volumétrica del suelo causada por la aplicación de PAM y yeso al terreno influyó significativamente en el rendimiento de la avena, propiciando un régimen de humedad favorable al desarrollo del volumen radicular (Lentz y Sojka, 2000), la absorción de la humedad disponible (Leib *et al.*, 2005) y por consiguiente al desarrollo del cultivo. Comparando los resultados obtenidos en el presente trabajo con otras investigaciones en donde utilizaron sistemas de riego más eficientes, podemos encontrar similitudes. Por ejemplo, Hanson *et al.* (2003) encontraron una tendencia similar utilizando riego por aspersión, mientras que Barrios-Díaz *et al.* (2006) obtuvieron un incremento del 27 al 30% del rendimiento de ajo, usando un riego por goteo en comparación con un riego en surcos. Sin embargo, es de importancia hacer notar que los incrementos en los rendimientos mostrados por Hanson *et al.* (2003) y Barrios-Díaz *et al.* (2006) se debieron al uso de riego más eficiente, y el incremento mostrado en el presente trabajo es debido a la aplicación de yeso y PAM utilizando riego por gravedad.

Lámina de Agua Calculada

La lámina de agua necesaria para satisfacer la demanda del cultivo de la avena, de acuerdo al programa CropWat 4, varía entre 50 y 60 cm durante todo

su periodo vegetativo. En este caso particular se consideró una lámina de 55 cm, tomando en cuenta que la mayor demanda del vital líquido se concentra durante la etapa de crecimiento y floración. El riego de auxilio, después de realizar la siembra, corresponde a una lámina de 14 cm, el segundo riego corresponde a una lámina de 10 cm aplicado 17 días después del primero, para finalmente aplicar los tres últimos riegos a intervalos de 13 días con una lámina de 10 cm, haciendo un total de 5 riegos. Es de importancia hacer notar que durante todo el ciclo vegetativo no ocurrieron precipitaciones.

Lámina de Agua Aplicada

En la Figura 2 se presenta la dinámica de la evolución del contenido de humedad volumétrico en el suelo en todo el ciclo vegetativo, los valores mostrados son un promedio de los 3 sensores instalados en cada parcela. Se observa que el contenido de humedad es mayor en la parcela con tratamiento que en la parcela control después de aplicar el primer riego con la misma lámina de agua en ambas parcelas. Esta diferencia también es apreciada en los riegos subsecuentes. El segundo riego se aplicó a los 17 días en la parcela de control, tal como se calculó con el programa Crop Wat 4, mientras que en la parcela tratada con yeso y PAM el segundo riego se aplicó hasta los 22 días. Dada la naturaleza del suelo usado en la investigación (suelo agrietable), se apreció que las grietas aparecieron a los 3 días después del riego en la parcela

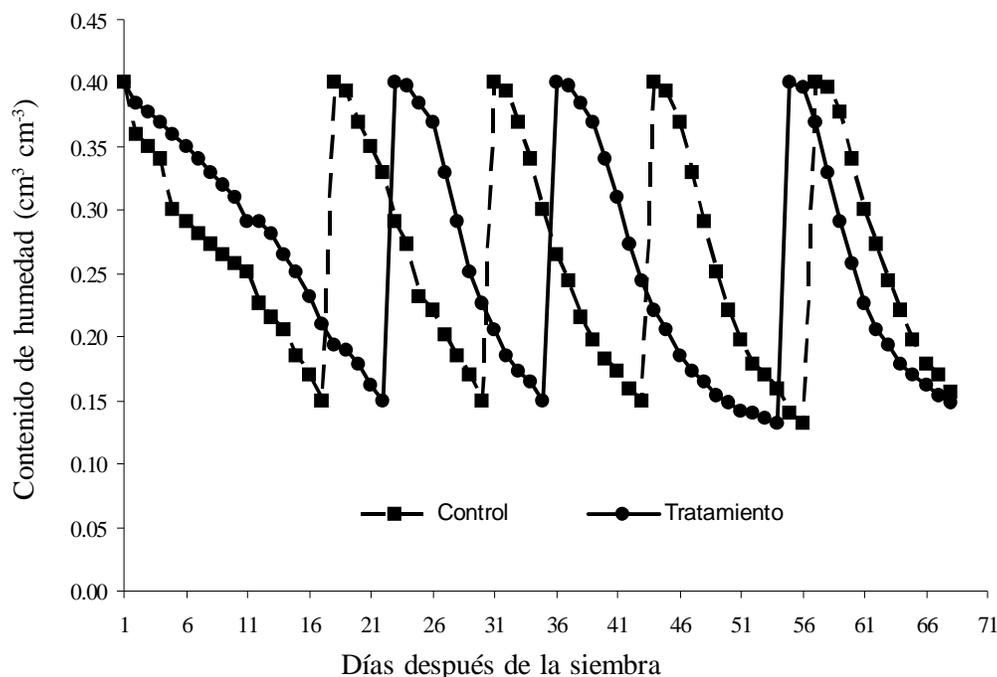


Figura 2. Dinámica de cambio de la humedad volumétrica del suelo a una profundidad de 30 cm en proceso de humedecimiento y secado durante el ciclo vegetativo de *Avena sativa*.

sin tratamiento, mientras que en la parcela tratada con yeso y PAM comenzaron a presentarse hasta después del décimo día. Durante el proceso de secado del suelo pudo verse que la aplicación de PAM formó un sello superficial, lo que permite inferir que disminuyó el agrietamiento del suelo y por consiguiente la evaporación del agua del suelo. Lo anterior, es debido a que hay un mayor contenido de humedad de agua en el suelo de la parcela con tratamiento en comparación con la parcela control. El efecto del yeso en suelos alcalinos, como el utilizado en este trabajo, es reemplazar los carbonatos alcalinos, responsables del alto pH, por sales como los sulfatos de mayor solubilidad (Yu *et al.*, 2003). Lo anterior, de acuerdo con investigaciones anteriores, mejora la estabilidad estructural del suelo (Cochrane *et al.*, 2005) y materia orgánica (Yu *et al.*, 2003), aireación, permeabilidad, mejor absorción de los nutrientes del suelo por las plantas (Lentz *et al.*, 2001), así como propiciar un mejor desarrollo radicular del cultivo (Lentz, 2003).

Eficiencia en el Uso del Agua

En la Figura 3 se observan las diferencias entre el volumen de agua aplicado en la parcela control y en la parcela con tratamiento. Los intervalos de riego

para la parcela control se siguieron conforme a lo calculado, haciendo un total de cinco riegos y una lámina aplicada de 55 cm, que equivale a un volumen de 5500 m³ ha⁻¹. Por otra parte, en la parcela con tratamiento se aplicaron solamente cuatro riegos, haciendo un total de 44 cm (4400 m³ ha⁻¹). En la Figura 3, puede verse que en la parcela con tratamiento, el primer riego de auxilio se aplicó a los 22 días después de la siembra, el segundo riego tuvo un intervalo de 14 días, y el último riego se aplicó 19 días después. De esta manera, la no aplicación del último riego en la parcela con tratamiento, lámina de 10 cm, equivale a un ahorro aproximado del 20% de la lámina total calculada y aplicada en la parcela control.

La eficiencia de producción en la parcela control fue de 4.77 kg m⁻³ de agua utilizada, mientras que la parcela tratada con yeso y PAM presentó una eficiencia de producción de 6.49 kg m⁻³ de agua utilizada. Esto equivale a un incremento de 1.72 kg m⁻³ de agua. De otra manera, el valor promedio de la EUA obtenida en la parcela tratada con yeso y PAM es superior en un 36% al obtenido por el sistema tradicional. El incremento en la EUA de la parcela con tratamiento en relación con la parcela control se debe a que la adición de yeso y PAM propiciaron una mayor retención de humedad en el suelo, el cual es mostrado en la Figura 2,

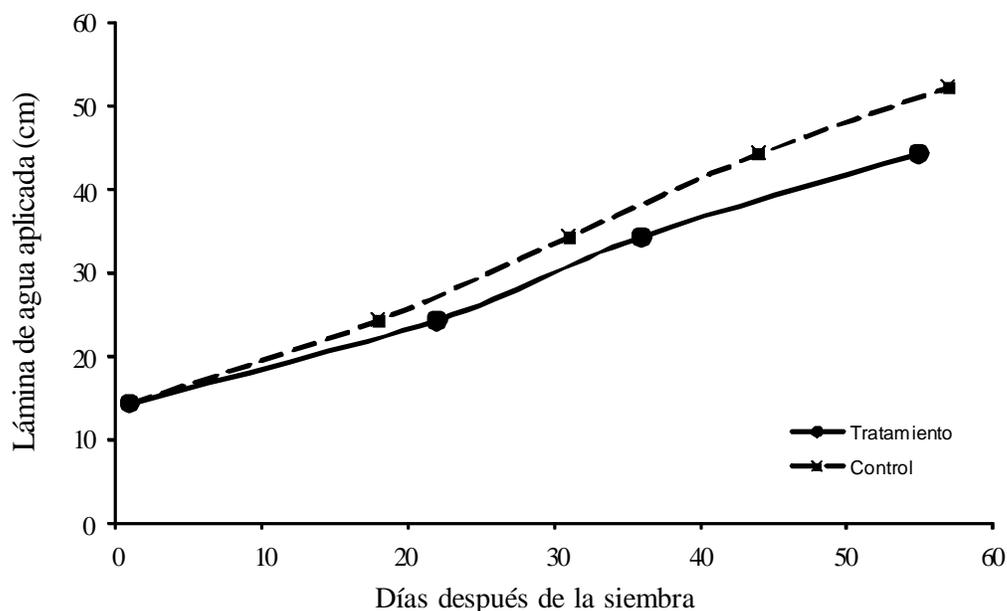


Figura 3. Láminas de agua aplicadas en las parcelas control y tratamiento cultivadas con *Avena sativa*.

e incrementaron la actividad microbiana del suelo (Cochrane *et al.*, 2005), favorecieron el desarrollo radicular de las plantas (Lentz, 2003) lo que trae como consecuencia una mejor absorción de los nutrientes del suelo (Lentz *et al.*, 2001).

Estos resultados coinciden con algunos índices obtenidos en investigaciones anteriores, sin embargo, son obtenidos con sistemas de riego más eficientes, como Patel *et al.* (1996) quienes reportan valores de 1.4 kg m^{-3} y 0.9 kg m^{-3} para el cultivo de ajo en un sistema de riego

por goteo y por surcos respectivamente y Al-Jamal *et al.* (2001) quienes obtuvieron valores de 5.9 kg m^{-3} en riego por goteo y valores de 4.6 kg m^{-3} en riego por gravedad, ambos en la producción de cebolla.

Lecturas SPAD

La concentración de clorofila en las hojas está fuertemente relacionado con la cantidad de nitrógeno (N) presente en la planta (Smeal y Zhang, 1994), así,

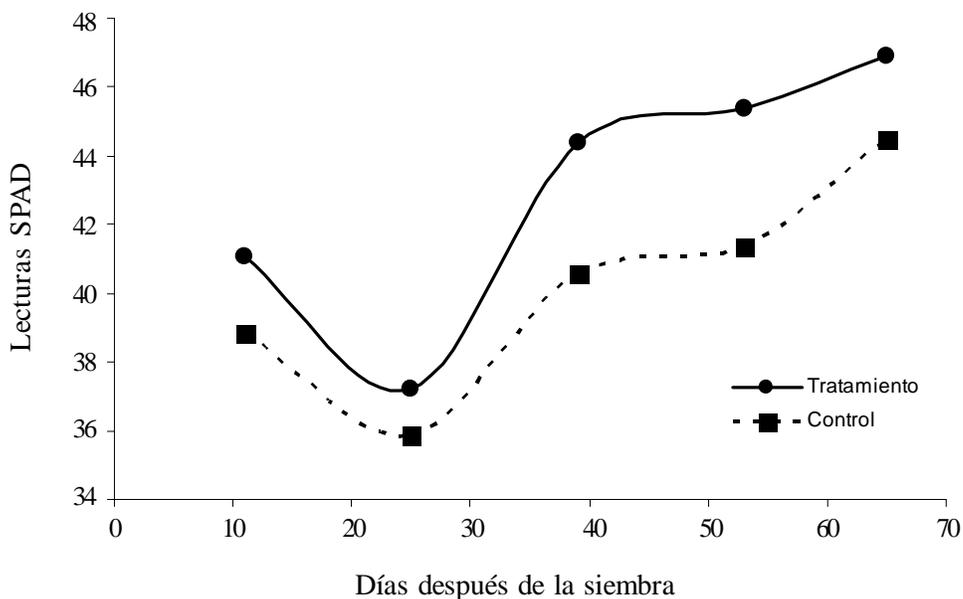


Figura 4. Evolución de las lecturas SPAD en plantas de *Avena sativa*.

la estimación del índice de verdor con el SPAD - 502 puede ser un estimador del nivel de N (Balasubramanian *et al.*, 2000). Esta relación permite obtener de manera indirecta la necesidad de agregar o no este nutriente al suelo (Netto *et al.*, 2005). Además, de que un riego deficiente ocasiona un bajo aprovechamiento de los nutrientes en el suelo (Benjamin *et al.*, 1998).

La evolución del índice de verdor en los dos tratamientos se muestra en la Figura 4. Se observa que las plantas en la parcela con tratamiento mostraron un color más verde que las plantas de la parcela control. En el día 25 hubo un decaimiento en el índice, que está relacionado con la pérdida de humedad en el suelo. Posteriormente hay una mejora en la intensidad del verde de las plantas, que se ven reflejadas hasta el término de su madurez fisiológica. De esta manera, la prueba t de Student demostró que los valores de intensidad de verdor medidos en las plantas con yeso y PAM difieren significativamente con las plantas sin tratamiento ($P < 0.005$). La desviación estándar promedio de los datos es 0.142 unidades SPAD. Las plantas tratadas con yeso y PAM sintetizaron una mayor cantidad de clorofila que las plantas sin tratamiento, esta mayor síntesis de clorofila se ve reflejada en una diferencia de alturas de las plantas (Figura 1) y en un 35% mejor rendimiento al término de la cosecha.

CONCLUSIONES

- El uso de poliacrilamida (PAM) y yeso aplicados a sistemas de riego por gravedad ayudan a reducir el consumo de agua para irrigar los cultivos. En el presente estudio se ahorró una lámina de 10 cm de agua, que representan $1000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. No obstante a pesar de la reducción del consumo de agua, los acondicionadores aplicados incrementaron el rendimiento de la avena en un 35%; el rendimiento obtenido fue de 20.95 Mg ha^{-1} en la parcela con tratamiento, 5.54 Mg ha^{-1} por encima de la parcela sin tratamiento.

- La eficiencia de producción en la parcela de control fue de 4.77 kg m^{-3} de agua utilizada, mientras que la parcela tratada con yeso y PAM presentó una eficiencia de producción de 6.49 kg m^{-3} . Lo anterior, representa un incremento de 1.72 kg m^{-3} de agua. El uso de PAM, en combinación con el yeso, es una forma simple y económica para mejorar el uso eficiente del agua en riego por gravedad, así como incrementar el rendimiento del cultivo, sin embargo, debido a que se degrada por

la luz solar e interrupción mecánica su efectividad sólo es temporal.

LITERATURA CITADA

- Agassi M., I. Shainberg, and J. Morin. 1981. Effect of electrolyte concentration and soil sodicity on the infiltration rate and crust formation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45: 848-851.
- Ajwa, H. A. and T. J. Trout. 2006. Polyacrylamide and water quality effects on infiltration in sandy loam soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 643-650.
- Al-Jamal, M. S., S. Ball, and T. W. Sammis. 2001. Comparison of sprinkler, trickle and furrow irrigation efficiencies for onion production. *Agric. Water Manage.* 46: 253-266.
- Amado A., J. P., P. Ortíz F. y J. J. Salmerón Z. 2000. Manejo agronómico de la avena en la Sierra de Chihuahua (variedades, agua, densidad de siembra y fertilización mayor). Folleto Científico No. 7. CESICH-CIRNOCINIFAP-SAGAR. Cd. Cuauhtémoc, Chih., México.
- Barrios-Díaz, J. M., M. C. Larios-García, J. Z. Castellanos, G. Alcántar-González, L. Tijerina-Chávez y M. N. Rodríguez-Mendoza. 2006. Efecto del sistema de riego y tensión de humedad del suelo en rendimiento y calidad del ajo. *Terra* 24: 75-81.
- Balasubramanian, V., A. C. Morales, R. T. Cruz, T. M. Thiyagarajan, R. Nagarajan, M. Babu, S. Abdulrachman, and L. H. Hai. 2000. Adaptation of the chlorophyll meter (SPAD) technology for real-time N management in rice: a review. *Int. Rice Res. Inst.* 5: 25-26.
- Benjamin, J. G., L. K. Porter, H. R. Duke, L. R. Ahuja, and G. Butters. 1998. Nitrogen movement with furrow irrigation method and fertilizer band placement. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 1103-1108.
- Bjorneberg, D. L., F. L. Santos, N. S. Castanheira, O. C. Martins, J. L. Reis, J. K. Aase, and R. E. Sojka. 2003. Using polyacrylamide with sprinkler irrigation to improve infiltration. *J. Soil Water Conserv.* 58: 283-289.
- Chávez, C., E. Ventura-Ramos y C. Fuentes. 2009. Control de la erosión en surcos de riego usando poliacrilamida. *Ing. Hidrául. Méx.* 24: 135-144.
- Clarke, D., 1998. Cropwat for windows: user guide. Versión 4.3. FAO, NWRC, IIDS. University of Southampton. Southampton, UK.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2010. Estadísticas del agua en México. México. D.F. 17-117.
- Cochrane, B. H. W., J. M. Reichert, F. L. F. Eltz, and L. D. Norton. 2005. Controlling soil erosion and runoff with polyacrylamide and phosphogypsum on subtropical soil. *ASAE.* 48: 149-154.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 1988. Irrigation water management: irrigation methods. Training Manuals 5: 35-40. Rome, Italy.
- FAO-UNESCO (Food and Agriculture Organization of the United Nations, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization). 1988. Mapa mundial de suelos. Roma, Italia.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema climático de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). 4ª ed. Talleres Offset Larios. México, D.F.

- Grenn, V.S. and Stott, D.E. 2001. Polyacrylamide: use, effectiveness, and cost of a soil erosion control amendment. *In*: Stott, D.E., Mohtar, R. and Steinhardt G. (editors). The global farm-selected papers from the 10th International Soil Conservation Organization Meeting. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, May 24-29, 1999, Purdue University. West Lafayette, IN, USA.
- Green, V. S., D. E. Stott, L. D. Norton, and J. G. Gravel. 2000. Polyacrylamide molecular weight and charge effects on infiltration under simulated rainfall. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1786-1791.
- Hanson, B., D. May, R. Voss, M. Cantwell, and R. Rice. 2003. Response of garlic to irrigation water. *Agric. Water Manage.* 58: 29-43.
- Leib, B. G., C. A. Redulla, R. G. Stevens, G. R. Matthews, and D. A. Strausz. 2005. Erosion control practices integrated with polyacrylamide to reduce sediment loss in furrow irrigation. *Soil & Water Division of ASAE.* 21: 595-603.
- Lentz, R. D. 2003. Inhibiting water infiltration with polyacrylamide and surfactants: Applications for irrigated agriculture. *J. Soil Water Conserv.* 58: 290-300.
- Lentz, R.D. and R.E. Sojka. 2000. Applying polymers to irrigation water: evaluating strategies for furrow erosion control. *Trans. ASAE* 43: 1561-1568.
- Lentz, R. D., R. E. Sojka, C. W. Robbins, D. C. Kincaid, and D. T. Westermann. 2001. Polyacrylamide for surface irrigation to increase nutrient-use efficiency and protect water quality. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 32: 1203-1220.
- Lentz, R. D., R. E. Sojka, and B. E. Mackey. 2002. Fate and efficacy of polyacrylamide applied in furrow irrigation: full-advance and continuous treatments. *J. Environ. Qual.* 31: 661-670.
- Netto, A. T., E. Campostrini, J. G. Oliveira, and R. E. Bressan-Smith. 2005. Photosynthetic pigments, nitrogen, chlorophyll a fluorescence and SPAD-502 reading in coffee leaves. *Sci. Hortic.* 104: 199-209.
- Norton, L. D., I. Shainberg, and K. W. King. 1993. Utilization of gypsyferous amendments to reduce surface sealing in some humid soils of the eastern USA. *Catena Supplement* 24: 77-92.
- Palacios V., E., A. Exebio G, E. Mejía S., A. L. Santos H. y Ma. E. Delgadillo P. 2002. Problemas financieros de las asociaciones de usuarios y su efecto en la conservación y operación de distritos de riego. *Terra* 20: 505-513.
- Patel, B. G., V. D. Khanpara, D. D. Malavia, and B. B. Kaneria. 1996. Performance of drip and surface methods of irrigation for garlic (*Allium sativum*) under varying nitrogen levels. *Indian J. Agron.* 41: 174-176.
- Shrestha, R. K., A. M. Thompson, and A. Roa-Espinoza. 2006. The effectiveness of polymers and additives on reducing suspended sediment. *J. Soil Water Conserv.* 61: 169-177.
- Smeal, D. and Zhang, H. 1994. Chlorophyll meter evaluation for nitrogen management in corn. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 25: 1495-1503.
- Minolta Camera Co. Ltd. 1989. Chlorophyll meter SPAD-502. Instruction Manual. Radiometric Instruments. Divisions, Osaka, Japan.
- Ventura, E. and L. D. Norton. 2000. Physical and chemical processes associated with structural soil degradation and surface soil erosion. pp. 135-144. *In*: Quintero-Lizaola *et al.* (Eds). La edafología y sus perspectivas al siglo XXI. Tomo I. CP, UNAM. UACH, Montecillo, estado de México, México.
- Yu, J., T. Lei, I. Shainberg, A. I. Mamedov, and G. J. Levy. 2003. Infiltration and erosion in soils treated with dry PAM and gypsum. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 630-636.