

¿CUANTA AGUA REQUIERE EL NOGAL PECANERO EN LA COSTA DE HERMOSILLO?

Fidencio Cruz-Bautista^{1*}; Julio César Rodríguez¹; Diana G. Reyes-Montoya²; Jesús E. López Avendaño³; Salah Er-Raki⁴

¹Departamento de Agricultura y Ganadería. Universidad de Sonora, Hermosillo, 83000, México.

²Maestría en Sistemas de Producción Agropecuaria, Departamento de Agricultura y Ganadería. Universidad de Sonora, Hermosillo, 83000, México.

³Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán de Rosales, 80200, México.

⁴Center of Agrobiotechnology and Bioengineering, Research Unit labelled CNRST (Centre AgroBiotech-URL-CNRST-05), Cadi Ayyad University, Marrakech, 40000, Morocco.

fidencio.cruz@unison.mx (*Autor de correspondencia)

Resumen

Este artículo aborda el uso del balance hídrico ($\text{Riego} + \text{lluvia} - \text{ETc} = 0$) para estimar la demanda de agua anual del nogal pecanero (*Carya illinoensis*) en la Costa de Hermosillo, Sonora. El nogal se ha adaptado bien en esta región, sin embargo, requiere una importante lámina de agua para su adecuado desarrollo y producción. Por tanto, el objetivo en este trabajo fue estimar la lámina de riego mensual y anual que requiere el nogal pecanero en esta región. Los resultados obtenidos en los ciclos 2020 al 2022 muestran que se deberían aplicar láminas de riego medias de 1,365 mm por ciclo similar a la ETc determinada *in situ* con la técnica de covarianza turbulenta (*Eddy Covariance Method*). El balance hídrico resulta positivo con un excedente de agua de 369 mm por ciclo; lo que significa que, considerando únicamente el riego, se podrían obtener ahorros de 147 mm, que representa una media de $1,470 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ por ciclo agrícola, sin provocar estrés hídrico en el nogal.

Palabras claves: Balance hídrico, Uso consuntivo, Agotamiento - agua – suelo, Nogal.

Introducción

El nogal pecanero (*Carya illinoensis* k.) es uno de los cultivos más rentables en la Costa de Hermosillo. Actualmente ocupa el 51.2 % (10,878 ha) de la producción total en Sonora con un rendimiento promedio de 2.0 t ha⁻¹ (Retes *et al.*, 2021; SIAP, 2023). Este cultivo se ha adaptado bien en esta región, pues tiene preferencia por los climas áridos y semiáridos. Pero presenta una larga fenología y alta cobertura (Rodríguez *et al.*, 2022), lo que conlleva a que evapotranspire una importante lámina de agua (Brown, 2010; Rodríguez *et al.*, 2018 y Rodríguez *et al.*, 2022).

Sammis *et al.*, (2004), Bawazir y King (2004), Brown (2010) y Valdez *et al.*, (2010) midieron la evapotranspiración (ETc) en huertas de nogal y determinaron un valor estacional y anual de 1200 a 1450 mm. Rodríguez *et al.*, (2022), en los últimos cinco años, han realizado mediciones de la ETc en nogal pecanero en la Costa de Hermosillo utilizando el método de covarianza de vórtices (EC) y reportan una ETc-media de 1,469 mm. También han registrado el riego y lluvia, obteniendo una lámina media de 1,718 mm.

Valdez *et al.*, (2010) recomendaron láminas de riego del orden de 1360 a 2100 mm anuales para nogales adultos; estas láminas de riego se estimaron usando la evapotranspiración de referencia (ETo) registradas en estaciones agroclimatológicas ubicada en la Costa de Hermosillo. Rodríguez *et al.*, (2011) reportaron una lámina anual de 2020 mm aplicada en una huerta adulta en la Costa de Hermosillo. Asimismo, Rodríguez *et al.*, (2022) mencionan que han observado una disminución del riego de 1,898 mm a 1,536 mm año⁻¹; esta disminución se atribuye a la práctica del enterrado de las líneas de riego.

Valdez *et al.*, (2013) y Vieira *et al.*, (2013) señalan que el riego en las huertas de nogal de la región rebasa en un 30 % las demandas reales. Valdez *et al.*, (2010 y 2018) mencionan que aplicando láminas de riego de 1360 a 1430 mm se han obtenido rendimientos promedio de 2.02 hasta 2.7 t ha⁻¹ de nuez de buena calidad. Por otra parte, las láminas de riego diarias aplicadas en la región oscilan entre los 8 a 10 mm día⁻¹, similar a su demanda atmosférica (Brown, 2010 y Reyes, 2021). Valdez *et al.*, (2013) señalan que los requerimientos mensuales en los meses de verano pueden alcanzar alrededor de 220 mm.

Las diferencias entre las láminas de riego aplicadas y las evapotranspiradas, indican que existe un potencial de reducción de la lámina de riego del orden de 200 mm por ciclo para el nogal pecanero. Por lo tanto, se pensaría que las láminas de riego anual para el nogal en huertas adultas deberían ser de 1,200 a 1,300mm. Sin embargo, aún se discute sobre los requerimientos de riego anuales reales.

Por otra parte, la práctica común en el manejo del riego en el nogal, y en los cultivos en general, es reponer el agua del suelo a la capacidad de campo (CC), después de que se ha abatido o consumido la humedad fácilmente aprovechable definida por la CC y el punto crítico de riego. Sin embargo, el contenido de agua a CC rara vez se determina *in situ* para cada ciclo agrícola; lo que conlleva, en la mayoría de los casos, a una percepción

errónea del agua disponible para los cultivos, y por lo tanto un mal manejo del riego. Pues muchos suelos agrícolas no son uniformes y pueden incluir horizontes que restringen el flujo y drenaje interno. Por lo tanto, es difícil estimar el agua retenida en el suelo y que necesita ser restituida mediante el riego.

Lo anterior, obliga a buscar estrategias que permitan mejorar la eficiencia de aplicación, como es el riego por goteo; así como determinar la correcta programación del riego, mediante la estimación del requerimiento hídrico de los cultivos, usando técnicas precisas *in situ* como la covarianza de vórtices (técnicas turbulentas) y el monitoreo del contenido de humedad del suelo, entre otros. Por lo que, el objetivo en este trabajo fue estimar la lámina de riego mensual y anual que requiere el nogal pecanero en la Costa de Hermosillo, aplicando el concepto de balance hídrico en los ciclos 2020 al 2022.

Materiales y Métodos

Este trabajo se realizó en una huerta adulta de nogal pecanero de 108 ha, en el predio Viñas de la Costa de Hermosillo ($28^{\circ} 55' 25''$, $-111^{\circ} 17' 59''$) (Figura 1). El marco de plantación de nogal es 6 m entre planta y 12 m entre líneas (139 plantas ha^{-1}) y fue plantado entre 1999-2000. En este sitio se instaló una torre micro-meteorológica de 21 m de altura. En la parte superior de la torre se tienen sensores para medir radiación neta (R_n), temperatura (T), precipitación (P) y humedad del aire (H_r). También se tiene instalado un equipo Eddy Covariance System (LI7550RS y WindMaster Pro Sonic Anemometer). Con los datos que registran estos sensores, se calcula la ET_o diaria y la ET_c horaria del nogal *in situ*.



Figura 1. Torre micrometeorológica en huera de nogal pecanero, Viñas de la Costa de Hermosillo, Sonora México.

En el suelo se instalaron sensores de reflectometría de dominio de tiempo (TDR 315L, ACClima) para medir el contenido de humedad volumétrica a profundidades de 0.30, 0.60, 0.90 y 1.2 m, a 0.20 m de separación de la línea de riego. Estos sensores se conectaron a un Datalogger DataSnap SDI-12 (Cuadro 1). El registro de datos se realizó a intervalo de 10 min, y se almacenan valores promedios a cada 30 min.

El sistema de riego es por goteo con manguera tipo RAM, con un gasto por gotero de 1.6 Lh⁻¹ espaciados a 0.6 m. Se colocaron dos líneas en cada lado del tallo del nogal. La primera línea de riego se ubica a 1.5 m del tallo y la segunda a 1.5 m de la primera dando un promedio de 40 goteros por árbol. Bajo la línea de riego, en un gotero, se instaló un pluviómetro (Texas Electronics) para cuantificar la lámina de riego aplicada y la duración en cada evento de riego.

El contenido de humedad del suelo a capacidad de campo (CC) (gravimétrico /volumétrico) de los estratos 0.3 y 0.6 m se determinó de acuerdo al método estándar, usando la olla de Richards y secado de la muestra a 105 °C por 24 horas en horno de convección. La densidad aparente se determinó por el método del Cilindro Uhland (Gabriels y Lobo, 2011).

Evapotranspiración

Se calculó la evapotranspiración de referencia (ET_o) usando datos meteorológicos diarios registrados y la aproximación FAO 56 (Allen *et al.*, 1998) (Ecuación 1).

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

donde,

ET_o es la evapotranspiración de referencia (mm·d⁻¹), R_n es radiación neta (MJ m⁻² d⁻¹), G es flujo de calor del suelo (MJ m⁻² d⁻¹), T es la temperatura del aire promedio diario (°C), Δ pendiente de la curva de presión a saturación a T (kPa °C⁻¹), y constante psicrométrica (kPa °C⁻¹), e_s presión de saturación del vapor a T (kPa), e_a presión de vapor promedio diario (kPa), u velocidad de viento promedio diario (m s⁻¹).

Mientras que el cálculo de la ET_c (Eddy Covariance System) se realizó con los datos micrometeorológicos (RAW), registrados a intervalos de 30 min, y la ecuación general (2) (Burba, 2022) usando el programa EddyPro ver. 6.0 (LI-COR).

$$F \approx \overline{\rho_a} \overline{W' S'} \quad (2)$$

donde; F representa el flujo de calor latente (\overline{LE} ; W m⁻²), Calor sensible (\overline{H} ; W m⁻²) y CO₂ ($\overline{CO_2}$; mg m⁻² s⁻¹), ρ_a densidad del aire (kg m⁻³), $\overline{W'}$ velocidad vertical del viento (m s⁻¹) y $\overline{S'}$ covarianza de las fluctuaciones del agua, calor, dióxido de carbono, metano, etc., respectivamente.

Expresando la ecuación 2 en términos de balance de energía se obtiene la ecuación 3:

$$LE + H = Rn - G \quad (3)$$

donde, Rn representa radiación neta ($W m^{-2}$), y G representa el flujo de calor del suelo ($W m^{-2}$). De la ecuación 3 se expresa LE en energía equivalente $ET\lambda$, y entonces $ET\lambda$ corregido en Eddy Covariance System se convierte en una lámina de agua equivalente ET ($mm h^{-1}$) (Wang *et al.*, 2020) expresado como:

$$ET = \frac{3600 * \lambda ET}{\lambda * \rho_w} \quad (4)$$

donde el valor de λ es $2.501 - 0.00236 T_a$ (T_a = temperatura del aire, °C), y ρ_w es la densidad del vapor de agua ($10^3 kg \cdot m^{-3}$), 3600 es el factor de conversión de horas y segundos.

Balance hídrico

Pereira *et al.*, (2010) recomienda usar el concepto del balance hídrico (BH) (Ecuación 5) para estimar las entradas y salidas de agua en el suelo para un intervalo de tiempo Δt , considerando una capa de suelo de espesor Z , limitada en la parte superior por la superficie del suelo y el límite inferior a la profundidad Zn , definido previamente.

$$\theta_i = \theta_{i-1} + \frac{(P_i - Q_{ri}) + I_{ni} - ET_{ci} - DP_i + GW_i}{1000z_{ri}} \quad (5)$$

donde: θ_i , es el contenido de agua del suelo en la zona radical ($mm \cdot mm^{-1}$) en el día i ; θ_{i-1} , es el contenido de agua del suelo en la zona radical ($mm \cdot mm^{-1}$) en el día $i-1$; P_i , es la precipitación en el día i (mm); Q_{ri} , es la escorrentía superficial en el día i (mm); I_{ni} , es la lámina de riego en el día i (mm), o la cantidad de agua de riego que realmente se infiltra para su almacenamiento en la zona radical; ET_{ci} , es la evapotranspiración del cultivo en el día i (mm); DP_i , es la percolación en el día i (mm), y GW_i , es el flujo acumulado de ascenso capilar en el día i (mm).

Sin embargo, la ecuación 5 considera las variables, Q_{ri} , DP_i y GW_i que son difíciles de registrar, medir o estimar a intervalos diarios. Por lo anterior, en este estudio el BH se realizó considerando las variables de entrada (riego y lluvia) y salida de agua (ET_c), (BH = Riego+lluvia- $ET_c=0$) para un intervalo de escala diaria para los ciclos 2020 al 2022.

Cuadro 1. Sensores instalados en torre micrometeorológica de la huerta de nogal pecanero en Viñas de la Costa de Hermosillo, Sonora México.

Variable medida	Sensor	Altura (m)
Flujo de calor sensible (H, W m ⁻²)	Anemómetro sónico (GILL)	21.0
Flujo de calor latente (LE, W m ⁻²)	IRGA 7500Rs (LICOR) y Anemómetro sónico (GILL)	21.0
Flujo de calor de suelo (G, W m ⁻²)	Placa HFP01SC (Hukseflux)	-0.1
Flujo carbono (CO ₂ , μmol m ⁻² s ⁻¹)	IRGA 7500Rs (LICOR) y Anemómetro sónico (GILL)	21.0
Temp., y humedad del aire (°C y %)	HMP60, (Vaisala)	15.0
Vel., y dir. del viento (m s ⁻¹ , grados)	Anemómetro sónico (GILL)	21.0
Temperatura de suelo (°C)	TDR315L (ACCLIMA)	-0.30,-0.60, - 0.90, - 1.20
Humedad de suelo (m ³ m ⁻³)	TDR315L (ACCLIMA)	-0.30,-0.60, - 0.90, - 1.20
Precipitación (mm)	Pluviómetro (Texas Electronics)	12.0
Riego (mm)	Pluviómetro (Texas Electronics)	0.5
Radiación neta (W m ⁻²)	Radiómetro neto (Kipp & Zonen)	19.2
Radiación solar incidente (W m ⁻²)	Albedómetro (Kipp & Zonen)	19.2
Radiación solar reflejada (W m ⁻²)	Albedómetro (Kipp & Zonen)	19.2

Resultados y Discusión

Bajo el concepto del balance hídrico (BH=Riego+lluvia-ETc=0) se determinó que se aplica un excedente de agua superior a 300 mm por ciclo en el nogal pecanero en el sitio de estudio (Cuadro 2). Si se despreja la lluvia entonces este excedente por riego es superior entre 60 a 235 mm, considerando que, se aplica una lámina de riego anual superior a 1500 mm (Cuadro 2).

Lo anterior muestra que no se hacen los ajustes correspondientes en las láminas de riego aplicadas durante el periodo de lluvias (julio y agosto). En el Cuadro 2 también se observa que la evapotranspiración real media del cultivo (ETc) es de orden de 1365 mm por ciclo. La ETc no muestran diferencias significativas entre los ciclos y la tendencia es similar en los tres ciclos (Figura 4).

Esto, permite señalar que se deberían aplicar láminas de riego medias de 1,365 mm por ciclo, similar a la ETc determinada *in situ*. Si no se considera la lluvia, representaría una reducción en la lámina de riego anual aplicada de 147 mm, lo que significa que se podrían obtener ahorros de alrededor de 1770 m³ ha⁻¹ por ciclo (1.77 millares de m³ ha⁻¹) (Cuadro 2). Estos resultados apoyan las propuestas de Valdez et al., (2010, 2018) y Vieira et al., (2013) que señalan que aplicando láminas de riego de 1360 a 1430 mm en árboles adultos se pueden obtener rendimientos promedio de 2.02 a 2.7 t ha⁻¹ de nuez de buena calidad. Asimismo, concuerda con lo mencionado por Sammis et al., (2004), Bawazir y King (2004) y Rodríguez et al., (2010) que una huerta de nogal en producción puede consumir una lámina de alrededor de 1.4 m de agua por año.

Cuadro 2. Balance hídrico en huerta de nogal pecanero en la Costa de Hermosillo, México.

Ciclo	Balance hídrico				Millar	
	Riego (mm)	Lluvia (mm)	ETc (mm año ⁻¹)	R+LI-ETc	m ³ ha ⁻¹	m ³ ha ⁻¹
2020	1594	153	1445	(+) 300	1446	1.45
2021	1528	267	1293	(+) 500	2410	2.41
2022	1415	246	1356	(+) 305	1463	1.46
Media	1512	222	1365	(+) 369	1773	1.77

También la ETc anual es concordante con los valores 1200 y 1450 mm reportados por Sammis *et al.*, (2004), Bawazir y King (2004), Brown (2010), Valdez *et al.*, (2010) y Rodríguez *et al.*, (2022). Asimismo, en la Figura 4 se aprecia que los valores diarios máximos de ETc entre 8 y 9 mm en primavera-verano son similares a los observados por Sammis *et al.*, (2004); Djaman *et al.*, (2018) para climas áridos y semi secos.

Por otra parte, analizando el contenido la humedad del suelo (θ_v) y su variación por efecto de las frecuencias y láminas de riego aplicadas (Figura 2), se observan valores cercanos a capacidad de campo (CC). La figura muestra que en algunos periodos la humedad se mantuvo por encima de CC, incluso en los estratos de 60, 90 y 120 cm. Lo que significa que las láminas aplicadas exceden la capacidad de retención del suelo y a la demanda de las plantas, vía evapotranspiración.

El contenido de humedad presentó el mismo comportamiento en los tres ciclos. Esta humedad alcanza valores de 28 a 31 % (θ_v) de marzo a septiembre. Después muestra una disminución entre 22 al 27 % (θ_v) de septiembre a noviembre, por efecto de la disminución de la frecuencia de riego. También se observa que en los cuatro estratos existe movimiento del agua, humedad del suelo, lo que indica que existe una redistribución hacia estratos inferiores, así como extracción por las raíces del nogal y posiblemente una percolación.

Como se señaló previamente, la práctica común en el manejo del riego en el nogal es reponer el agua del suelo a la CC, después de que se ha consumido la humedad fácilmente aprovechable. Sin embargo, la CC no necesariamente se cumple en el campo, como se ha mostrado en la Figura 2. Esto conlleva a una percepción errónea del requerimiento de riego, así como del agua disponible para el cultivo y por lo tanto un mal manejo del riego.

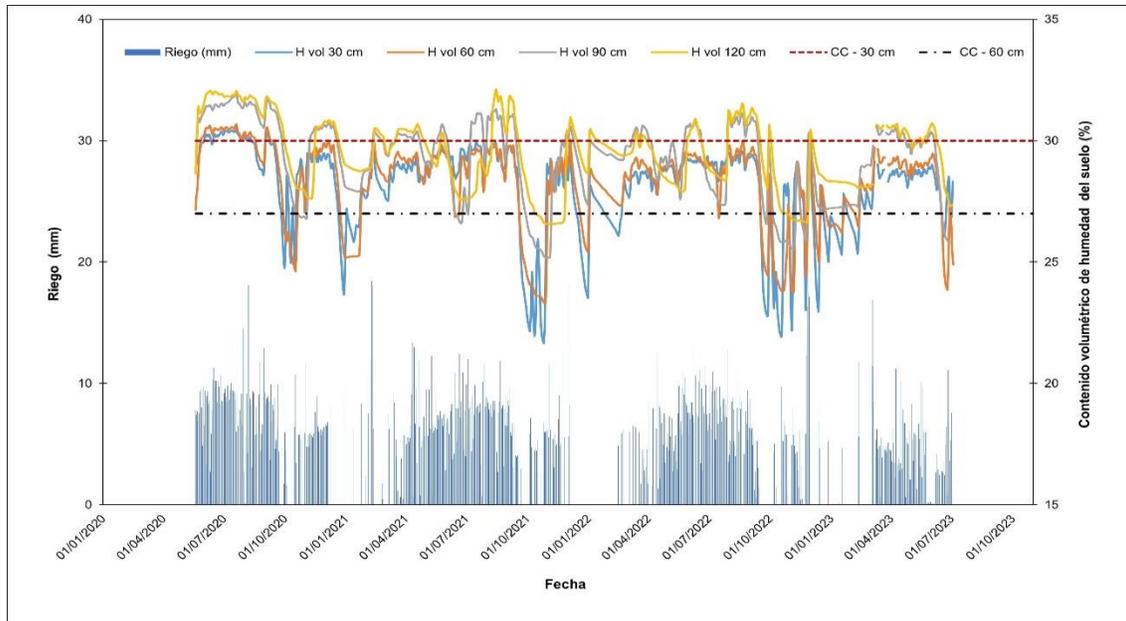


Figura 2. Láminas de riego aplicadas en huerta de nogal pecanero en la Costa de Hermosillo, México, y variación del contenido la humedad (θ_v) en el perfil del suelo.

Para reducir la ambigüedad sobre el agua disponible en el perfil del suelo, se usó el concepto de “agotamiento del agua del suelo” propuesto por Evett *et al.* (2019). Se utilizó el contenido máximo de agua del suelo como punto de referencia y se determinó el agotamiento para cada estrato. Se convirtieron los valores del contenido de agua en valores equivalentes para cada profundidad, para reducir la ambigüedad respecto a la capacidad de almacenamiento y retención del agua en el suelo (Figura 3).

Este enfoque revela una representación más consistente de la respuesta del suelo a la aplicación y remoción del agua. En la figura 2 se observa en los estratos de 30, 60 y 90 cm hubo mayor agotamiento, entre 5 a 8.5 % (θ_v) equivalente al 65 % de la humedad total del suelo. También se observa que los mayores agotamientos del agua en el perfil del suelo ocurren a partir de la segunda semana de septiembre a la tercera semana de noviembre, en los tres ciclos. Esto coincide con la disminución de la frecuencia de riego, pues en esta etapa ocurre la apertura del ruezno, cosecha y caída de las hojas del nogal en la zona.

El uso de sensores, como el TDR 315L y la implementación del concepto “agotamiento del agua del suelo”, permiten estimar de manera más precisa la cantidad de agua que deberá reponerse en cada evento de riego. Pues elimina la influencia de factores como la textura, la densidad aparente y el contenido de materia orgánica en los valores registrados. Por otra parte los TDR 315L, según el manual técnico, tienen un margen de error del orden de 2 % de θ_v (Acclima, Inc. 2017).

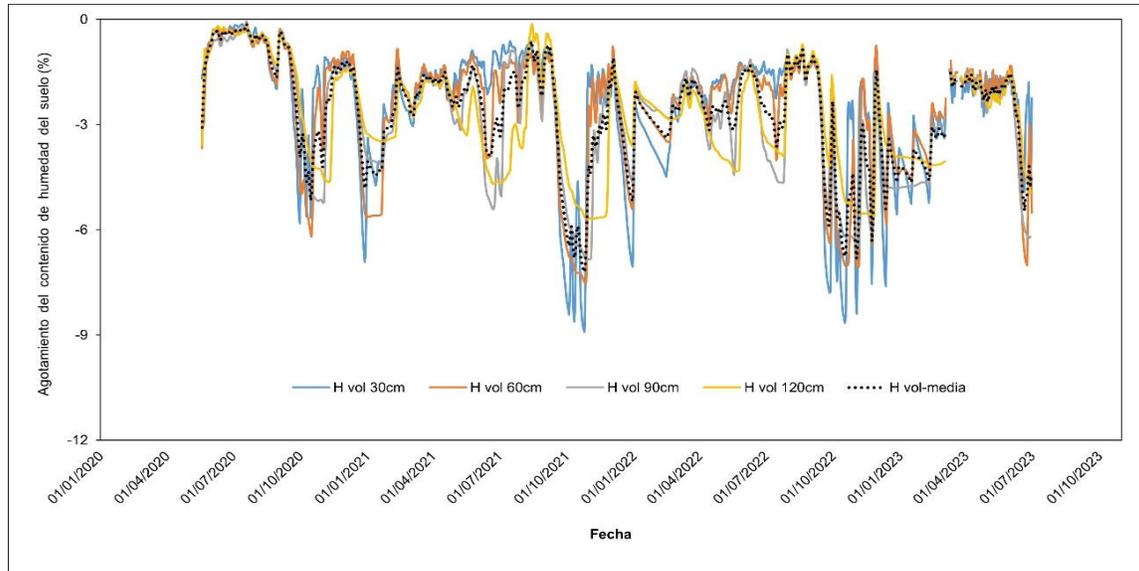


Figura 3. Contenido máximo y agotamiento de agua del suelo por estratos, valores equivalentes, aplicando el concepto de “agotamiento del agua del suelo”.

Si el agotamiento del agua en el perfil del suelo se expresa en términos de lámina (mm d^{-1}) se clarifica aún más la capacidad de retención y remoción del agua (Figura 4). Esta figura muestra claramente las láminas de riego aplicadas (mm d^{-1}) y la lámina almacenada y removida en el perfil del suelo (mm d^{-1}) de 30 a 120 cm. En la misma figura se observa la lámina evapotranspirada (mm d^{-1}). En esta figura se observa que el suelo alcanza a retener hasta 12 mm d^{-1} . También se aprecia que la lámina removida en el perfil del suelo puede alcanzar hasta los 9.5 mm (12 a 2.5 mm), es decir que no se llega al agotamiento total. Esta lámina removida, en algunos periodos del ciclo del nogal, es equivalente a la ET_c máxima que se presenta en el cultivo. Por el contrario, las láminas de riego aplicadas por evento, siempre son superiores a la ET_c , y en algunos casos alcanzan hasta los 18 mm por día (Figura 4).

Lo anterior causa que el suelo tenga humedad disponible en la mayor parte del ciclo del nogal. Únicamente durante el periodo de segunda semana de septiembre a la tercera semana de noviembre es cuando ocurre el mayor agotamiento. Sin embargo, con la disminución de la tasa evapotranspirativa, por la senescencia del nogal, y los riegos posteriores la humedad disponible se restablece entre los 5 y 8 mm para el siguiente ciclo. Lo anterior permite reafirmar que es recomendable que se apliquen láminas de riego de 8 a 10 mm por evento, como lo se ha señalado previamente. Estas láminas de riego guardan relación con la capacidad de retención de agua en el perfil del suelo y la tasa evapotranspirativa del nogal en el sitio de estudio (Figura 4).

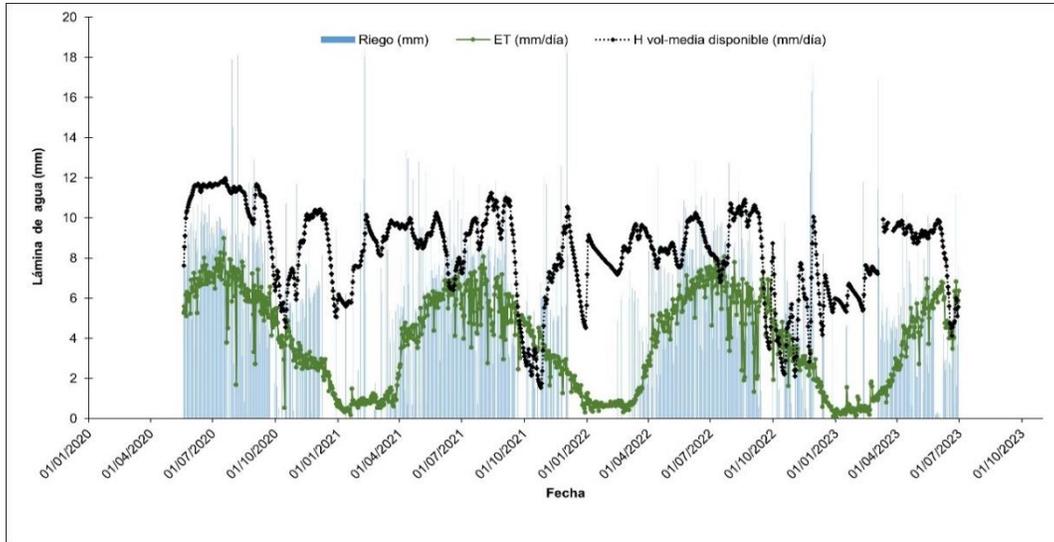


Figura 4. Riego, evapotranspiración del cultivo y agua disponible en el perfil del suelo en huerta de nogal pecanero en la Costa de Hermosillo, México.

Con los resultados mostrados en la figura 4, es posible generar y recomendar una calendarización del riego. En este sentido se propone un calendario con láminas de riego mensual para el nogal en el Cuadro 3. Estas láminas mensuales se puede distribuirse de acuerdo a la demanda del cultivo (ETc) y a las láminas de riego sugeridas de 8 a 10 mm por evento. Pues en general los calendarios de riego, para la mayoría de los cultivos, se reportan de manera mensual.

Cuadro 3. Láminas de riego recomendadas para el nogal pecanero para el sitio Viñas de la Costa, Hermosillo Sonora, México.

Mes	Ciclo			Lámina media mensual (cm)	Desv. Estandar
	2020	2021	2022		
Enero	1.0	1.5	1.5	1.4	0.3
Febrero	3.1	1.4	1.6	2.0	0.9
Marzo	4.5	4.4	4.7	4.5	0.2
Abril	12.3	9.4	13.4	11.7	2.1
Mayo	16.8	17.0	17.5	17.1	0.4
Junio	20.6	18.5	20.3	19.8	1.1
Julio	22.9	18.8	20.1	20.6	2.1
Agosto	18.6	17.8	17.6	18.0	0.5
Septiembre	17.2	14.9	14.3	15.5	1.5
Octubre	11.9	12.4	12.5	12.3	0.3
Noviembre	8.6	8.5	9.1	8.7	0.3
Diciembre	6.8	5.4	3.5	5.2	1.7
Total	144.2	130.0	136.0	136.8	

Este calendario considera aplicar al menos un riego en el mes de enero para complementar la humedad residual del suelo de alrededor de 5.5 mm (Figura 4). En el mes de febrero se considera aplicar dos riego. En los meses posteriores las frecuencias de riego se incrementan por la brotación del follaje del nogal, formación de frutos y materia seca. Implementando este calendario de riego, el uso consuntivo del nogal sería de alrededor de 1357 mm al término del ciclo productivo (Cuadro 3). Esta calendarización y uso consuntivo anual, es similar a la recomendada por Valdez (2010, 2015 y 2018). Aunque el mismo autor menciona que en la lámina de riego del mes de marzo se incluye un fondo de humedad, correspondiente a una lámina adicional de 42 mm. Sin embargo, como se ha mostrado en la figura 4, el suelo tiene humedad disponible para el cultivo para ese periodo.

Conclusiones

Los resultados mostrados en este trabajo permiten señalar que el uso consuntivo del nogal para el sitio de estudio es de alrededor de 1365 mm al año. Por lo que se visualiza viable disminuir las láminas de riego actuales en 150 mm, sin provocar estrés hídrico en el nogal, reforzando la propuesta de Rodríguez *et al.*, (2022). Esta reducción representa un ahorro de agua de riego de alrededor de 1470 m³ ha⁻¹ por ciclo por hectárea (1.47 millares de m³ ha⁻¹). Esta estrategia permitirá hacer un uso eficiente del agua sin mayor impacto en los rendimientos; considerando que, en la mayoría de los casos, como se ha mostrado en este trabajo, existe una tendencia general a sobre-regar.

Por otro lado, el uso del balance hídrico, sensores de humedad del suelo y el “agotamiento del agua del suelo” permiten estimar de manera más precisa la cantidad de agua que deberá reponerse en cada evento de riego.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al grupo dos triángulos por permitir el uso de sus instalaciones y su apoyo técnico, en el campo Viñas de la Costa, en especial al Gerente general Ing. Esteban Coppel y al encargado de campo José Alfredo López (Maro). Sin ellos no hubiera sido posible realizar y continuar el proyecto a largo plazo de monitoreo de consumo de agua y secuestro de carbono en nogal pecanero. También desean agradecer a los patrocinadores, la Agencia Mexicana de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AMEXCID) y a su contraparte en Chile (AGCID), por creer en el proyecto “Incremento de la eficiencia y cuidado del agua mediante experiencia conjunta entre comunidades de Sonora-México y Linares- Chile” y apoyarlo económicamente.

Referencias bibliográficas

Acclima.Inc. Soil Moisture Sensors. 2017. <https://acclima.com/digital-tdr-soil-moisture-sensors/>
Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. 1998. Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO, Rome.

- Brown, W. P. 2010. Pecan water use estimates for Southern Arizona and Northern México. XI Simposio Internacional de Nogal Pecanero. pp. 54-61.
- Burba, G. 2022. Eddy Covariance Method for Scientific, Regulatory, and Commercial Applications. LI-COR Biosciences, Lincoln, USA, Hard- and Softbound, 702 pp. ISBN: 978-0-578-97714-0
- Djaman, K., O'Neill, M., Diop, L., Bodian, A., Allen, Samuel., Koudahe, K., and Kevin. L. 2018. Evaluation of the Penman-Monteith and other 34 Reference Evapotranspiration Equations under Limited Data in a Semiarid Dry Climate. Theoretical and Applied Climatology.
- Evet, S.R., Stone, K.C., Schwartz, R.C. 2019. Resolving discrepancies between laboratory-determined field capacity values and field water content observations: implications for irrigation management. Irrig Sci 37, 751–759.
- Gabriels, G. y Lobo, D.L. 2006. Métodos para determinar granulometría y densidad aparente del suelo. Venesuelos, 14, 37-47.
- Pereira, L. S., de Juan V.J.A., Picornell, B. M.R. y Tarjuelo, M.B. 2010. El Riego y sus Tecnologías. 1ª Edición en castellano. Albacete, España. 296 p.
- Retes, R., Moreno S., Ibarra A., Martín, M., Suárez, N. 2021. Cultivo de nogal pecanero en la Costa de Hermosillo asociado a su rentabilidad, ciclo 2020. Revista Mexicana de Agronegocios.
- Rodríguez, J.C., J. Grageda, C.J. Watts, A. J. Garatuzza-Payan, Castellanos-Villegas, J. Rodríguez-Casas, J. Saiz, V. Olavarrieta. 2010. Water use by perennial crops on the lower Sonora watershed. Journal of Arid Environment 74:603-610.
- Rodríguez, M., Arreola, J., Reyes, I. 2018. Producción y viviparidad de nuez pecanera bajo diferentes niveles de humedad del suelo en el norte de México. XIV Congreso Nacional sobre Recursos Bióticos de Zonas Áridas.
- Rodríguez, J. C., Ortega-Farías S., Cruz-Bautista, F., Gámez-Lucero, A., Chávez-Valenzuela, M., Castellanos, A.E., Ochoa-Meza, A., Er-Raki, S., Lizárraga-Celaya, C. 2022. Balance hídrico en una huerta adulta de nogal pecanero (*Carya illinoensis*) en la Costa de Hermosillo, México. XXIII Simposio Internacional de Nogal Pecanero. Hermosillo, Sonora.
- Sammis, T.W., J.G. Mexal, D. Miller. 2004. Evapotranspiration of flood irrigated pecans. J Agric Water Manage 69(3):179–190.
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>
- Valdez-Gascón, B., L. J. Durón-Noriega, J. E. Ortiz-Enriquez, J. M. Ramírez-Díaz y R. Sesma-León. 2010. ahorro de agua en huertas de nogal pecanero *Carya illinoensis* (Wangenh.) K.Koch] con apoyo de monitoreo de humedad. XI Simposio internacional de nogal pecanero. Hermosillo, Sonora, México.
- Valdez, G. B. Vieira, F., Ortiz, E., Velázquez, D. Zarate, R. 2013. Consideraciones técnicas en el manejo del agua en huertas de nogal con riego por goteo en la Costa de Hermosillo. XIV Simposio Internacional de Nogal Pecanero. Memoria Científica No. 4. Hermosillo, Sonora. México. p-38-43.
- Valdez, B., Vierira, F., Ortiz, J., Pérez, A., Velazquez, D. 2015. Incremento del aprovechamiento del agua en huertas de nogal con sistemas de riego por goteo sub-superficial en la costa de Hermosillo. XVI simposio internacional de Nogal Pecanero.
- Valdez, G. B., Vieira, de F. F., Ortiz, E. J. E., Pérez, L. A., 2018. Mejora del Aprovechamiento del Agua en Huertas de Nogal con Sistemas de Riego por Goteo Sub-Superficial en la Costa de Hermosillo. Serie Agua y Riego. Núm. 25. Artículos Técnicos de INTAGRI. México.
- Wang, Fangfang., Ma, Donghao., Zhao, Wenju., Lu, Yunxuan., Zhou, Ding., Zhang, Jiabao., Chen, Lin. and Huang, Ping. 2020. A validation of Eddy Covariance technique for measuring crop evapotranspiration on different time scales in the North China Plain. Canadian Journal of Soil Science. 101: 134 -146.