

SIMULACIÓN DE ESTRATEGIAS DE PROGRAMACIÓN DEL RIEGO Y EL EFECTO DE LAS PROPIEDADES HIDRÁULICAS SOBRE EL BALANCE DE AGUA Y EL RENDIMIENTO DEL CULTIVO

Fontanet, M.^{1,2,3*}, Fernàndez-Garcia, D.^{2,3}, Rodrigo, G.¹, Ferrer, F.¹

¹LabFerrer, Carrer Ferran Catòlic, 3, 25200, Cervera. mireia@lab-ferrer.com

²Departamento de Ingeniería del Terreno y Ambiental, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona, 08034, Spain. daniel.fernandez.g@upc.edu

³Associated Unit: Hydrogeology Group (UPC-CSIC)

RESUMEN. La programación de riego es el proceso mediante el cual hay que ajustar la frecuencia y la duración de los riegos para garantizar el máximo rendimiento, evitando la salinización del suelo y maximizando el rendimiento del cultivo con el mínimo volumen de agua aplicado. En este trabajo, se ha desarrollado una metodología que simula con HYDRUS 1D diferentes estrategias de programación de riego combinando diferentes duraciones y frecuencias. Los componentes del balance hídrico y un análisis económico se calcularon para determinar cuál era la estrategia óptima de riego. Los resultados han sido comparados con otro suelo para demostrar que, dependiendo de las propiedades hidráulicas del suelo, la estrategia óptima es distinta. Los resultados muestran que esta metodología fue capaz de proporcionar una programación de riego óptima.

ABSTRACT. The irrigation scheduling is the process where the irrigation frequency and the duration of each irrigation event is determined with the main goal of guaranteeing maximum yield and avoiding soil salinization with the minimum water volume. In this study a methodology was developed simulating with HYDRUS 1D different irrigation scheduling strategies, combining various frequencies and irrigation durations. Water balance components from each simulation and an economical analysis were conducted to determine which strategy was the optimal. Results were compared with another soil type to demonstrate that depending on soil hydraulic properties, the optimal irrigation scheduling is different. Results also showed that this methodology that was capable to define an optimal irrigation scheduling strategy.

1.- Introducción

En un contexto de evidencia de cambio climático y el hecho de que la agricultura utiliza alrededor del 70% del agua disponible para el riego en áreas semiáridas, existe una probabilidad cada vez mayor de escenarios locales de escasez de agua; por lo tanto, la optimización del agua es uno de los principales objetivos de los investigadores.

La programación del riego es el proceso donde se determina el momento que hay que aplicar agua (Ψ_{th}) y también la cantidad necesaria (t_{ir}), para garantizar la máxima producción con el mínimo volumen de agua

aplicado. Se ha demostrado que utilizar como límites inferiores la humedad de suelo o potencial hídrico incrementa la eficiencia del riego (Dabach et al., 2013). El agua de riego contiene sales y fertilizantes que hacen aumentar la Conductividad Eléctrica (CE) del suelo y pueden salinizar el mismo. Es por este motivo que la programación del riego tiene que tener en cuenta, también, el lavado de sales de la zona radicular.

Dada la importancia de la programación del riego, un amplio abanico de metodologías han sido desarrolladas y son usadas a día de hoy. En este trabajo se han distinguido cuatro metodologías; (i) el cálculo de las necesidades hídricas, (ii) medidas directas del estrés hídrico en el cultivo, (iii) medidas de humedad, succión del suelo, y finalmente (iv) modelos numéricos de flujo y transporte de solutos en la zona no saturada.

- (i) Las necesidades hídricas calculadas mediante la demanda evapotranspirativa del cultivo (ET_c) es la metodología más usada para la programación del riego, dada su simple y fácil aplicación. La ET_c cuantifica el agua que se ha evapotranspirado durante un periodo de tiempo determinado, y que, por lo tanto, tiene que ser reemplazada mediante el riego. La desventaja es que no se tiene información de cómo repartir el agua durante el periodo de tiempo determinado.
- (ii) Las medidas del estado hídrico del cultivo, nos proporcionan información de si el cultivo está en un momento determinado bajo condiciones de estrés o no. Aunque este tipo de medidas dan información directa del estado del cultivo, no proporcionan información de cómo aplicar ni programar el riego.
- (iii) En los últimos años, distintos tipos de sensores se han desarrollado para medir de forma continua humedad de suelo, succión y CE. Con estas medidas se puede determinar el momento en que hay que aplicar agua y también la cantidad a aplicar. Estos sensores, acostumbran a tener un precio elevado, por tanto, hay que optimizar su compra y con pocos sensores hay que representar toda la parcela de cultivo. Este hecho requiere de un conocimiento previo de como se mueve el agua en el suelo.
- (iv) Finalmente, los modelos numéricos son capaces de medir el flujo de agua y transporte de solutos en la zona no saturada, haciéndolos una

herramienta óptima para la simulación de la programación del riego. Muchos autores utilizan HYDRUS (Šimůnek et al., 2016, 2008) para simular el riego en una parcela de cultivo (Arbat et al., 2008; Dabach et al., 2013; Siyal and Skaggs, 2009; Skaggs et al., 2010; Twarakavi et al., 2009). Para obtener todas sus ventajas cuando se utiliza un modelo numérico, hay que utilizar unas propiedades hidráulicas del suelo lo más representativas posible. Esto a veces no es posible y muchos autores utilizan funciones de edafo-transferencia, produciendo que el resultado de las simulaciones sea aproximado. Para solventar esta desventaja, desde hace unos años, se han desarrollado tres equipos de laboratorio que permiten caracterizar el suelo de forma experimental, estos son el equipo Hyprop, (METER Group, Pullman, WA, USA), el WP4c (METER Group, Pullman, WA, USA) y finalmente el equipo KSat (METER Group, Pullman, WA, USA). Se ha demostrado que la combinación de estos equipos proporciona las propiedades hidráulicas más representativas del suelo analizado (Schelle et al., 2013).

Anteriormente se ha puesto de manifiesto que todas las metodologías para programar el riego existentes a día de hoy, tienen ventajas y desventajas. Por esta razón, se ha desarrollado una metodología para determinar una programación de riego óptima. Esta metodología utiliza HYDRUS 1D para simular distintas programaciones de riego representando el mismo sistema (suelo, cultivo, clima...), de este modo, se analizan los componentes del balance de agua para evaluar cada estrategia de riego y finalmente con una función objetivo, se contabiliza el rendimiento económico que se puede obtener con cada una de ellas.

Los objetivos principales de este trabajo son:

- presentar una metodología para determinar una programación del riego óptima para maximizar el rendimiento del cultivo, en este caso maíz, con el mínimo volumen de agua aplicado.
- demostrar como distintas estrategias de riego modifican el balance de agua al final de la campaña de riego.
- como en función de las propiedades hidráulicas del suelo la programación del riego tiene que ser distinta.

2.- Material y métodos

2.1.- Área de estudio

El área de estudio se encuentra en el municipio de Foradada, Lleida, España, donde el clima predominante es semiárido.

La parcela de cultivo tiene una extensión de 25 ha y su sistema de riego por aspersión, con una pluviometría por

aspersor de $6,5 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$. El suelo, tiene una textura de 28% arcilla, 58,4% de limo y 13,6% de arena, correspondiente a un suelo franco arcillo-limoso, según la clasificación USDA.

El cultivo presente en la parcela durante este estudio, es maíz, el cual, fue sembrado a finales de junio y cosechado a inicio de octubre del año 2016.

2.2.- Determinación riego óptimo

HYDRUS 1D es utilizado para simular distintas estrategias de programación de riego para la parcela agrícola de Foradada. La ecuación de Richards (Ec.1) (Richards, 1931) es solucionada mediante el método de elementos finitos.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial z} - K(h) \right] - S, \quad (1)$$

donde $\theta(h)$ es el contenido volumétrico de agua a una succión $h(-)$ determinada, t es el tiempo, z es la distancia entre nodos y $k(h)$ es la conductividad hidráulica no saturada.

El dominio del modelo es representado por un perfil de suelo uniforme de 60 cm de profundidad. Para poder obtener las propiedades hidráulicas del suelo, se ha tomado una muestra de suelo inalterada que ha sido analizada con los equipos Hyprop, WP4c y KSat. Las propiedades hidráulicas medidas son ajustadas mediante el modelo de van Genuchten-Mualem (Ec. 2-3) (van Genuchten, 1980),

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$K(h) = K_s S_e^I \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2, \quad (3)$$

donde θ_s ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$), es el contenido en humedad en saturación, θ_r ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$), es la humedad residual, K_s ($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$), es la conductividad hidráulica saturada, n , α , I , son parámetros de forma unidimensionales.

Los datos meteorológicos son necesarios en el modelo, de este modo, la evapotranspiración de referencia (ET_0) ha sido calculada mediante la ecuación de Penman Monteith, para convertirla a ET_c según Allen et al. (1998) mediante el coeficiente de cultivo (K_c). El modelo necesita los valores de evaporación potencial (E_p) y de transpiración potencial (T_p) por separado, es por este motivo que se ha aplicado el coeficiente de cobertura del cultivo (Raes et al., 2017).

La absorción de las raíces es considerada en el modelo y está descrita como el término S de la ecuación de Richards. En la ecuación 4 se consideran la T_p en la zona radicular, la densidad de raíces (β) y la función de estrés hídrico ($\alpha(h)$),

$$S(h, h_\phi, z, t) = \alpha(h, h_\phi, z, t) \beta(z, t) T_p(t), \quad (4)$$

La transpiración real (Ec.5) (T_a) es calculada integrando

la ecuación 4 en toda la zona radicular (L_R).

$$T_a = \int_{L_R} S(h, h_\phi, z, t) dz = T_p \int_{L_R} \alpha(h, h_\phi, z, t) \beta(z, t) dz \quad (5)$$

La función de estrés hídrico (Ec.6) corresponde a la función propuesta por Feddes, (1974), que es una función lineal parametrizada por 4 puntos críticos de succión del suelo. La función describe que existe un rango de succión donde el maíz, u otro tipo de cultivo, se encuentra en condiciones óptimas, otros dos rangos donde el estrés hídrico aumenta linealmente y finalmente dos puntos donde el estrés es máximo sin que haya transpiración.

$$\alpha(h) = \begin{cases} \frac{h-h_4}{h_3-h_4} & h_3 > h > h_4 \\ 1 & h_2 \geq h \geq h_3 \\ \frac{h-h_1}{h_2-h_1} & h_1 > h > h_2 \\ 0 & h \leq h_4 \text{ or } h \geq h_1 \end{cases} \quad (6)$$

Los parámetros h_1, h_2, h_3, h_4 han sido extraídos de la base de datos interna que ofrece HYDRUS, que son, -15, -43, -600 y -8000 hPa, respectivamente.

Se han impuesto tres condiciones distintas de contorno de flujo de agua. La primera está impuesta en la parte superior del dominio, representando condiciones atmosféricas, la segunda está definida en la parte inferior del dominio para representar drenaje libre de agua y finalmente la tercera es la responsable de programar el riego. Esta última condición de contorno es definida mediante la inserción de un punto a 20 cm de profundidad del dominio, que controla que cuando la succión del suelo es más pequeña que un valor de succión (Ψ_{th}) definido previamente, el modelo aplica agua durante un tiempo (t_{ir}).

Diversas simulaciones se han repetido haciendo varias combinaciones de Ψ_{th} (-10, -20, -30, -50 y -100 kPa) y t_{ir} (1, 2, 3 y 4 h·d⁻¹) para a posteriori, analizar los componentes del balance de agua.

Se ha definido una función objetivo por tal de cuantificar el Margen Neto (NM) (€·ha⁻¹) (Ec.7) que se puede obtener en cada estrategia de riego.

$$NM = GM - Opex - Capex, \quad (7)$$

donde $Opex$ (Ec.8) (€·ha⁻¹) son los gastos asociados al riego y $Capex$ (Ec.9) (€·ha⁻¹) son los gastos asociados a la instalación del sistema de riego.

$$Opex = C_{Fix} + \sum_{i=1}^{N_t} I_i \Delta t_i (C_{wVar} + C_e), \quad (8)$$

$$Capex = C_m + C_c \quad (9)$$

$$GM = Y_a C_y, \quad (10)$$

donde, C_{Fix} es el coste de agua fijo, que en la zona de estudio es de 115,35 €·ha⁻¹, C_{wVar} , es el coste de agua variable, fijado

$$GM = Y_a C_y \quad (11)$$

a 0,1003 €·m⁻³, C_e , es el coste de energía, que en este caso no se ha podido obtener información, I (m³·ha⁻¹), es el agua aplicada durante toda la campaña de riego. C_m y C_c son los costes de mantenimiento y de instalación del sistema de riego, los cuales no se han obtenido información. Finalmente GM (Ec.11) (€·ha⁻¹) es el margen bruto, que es el producto entre el precio de cosecha fijado a 167 €·ha⁻¹ (www.mapama.gob.es) y Y_a (Ec.12) (t·ha⁻¹) es el rendimiento real calculado con la función de Stewart et al., (1977),

$$Y_a = Y_p \prod_{k=1}^4 \left(1 - K_y \left(1 - \left(\frac{ET_a}{ET_c} \right)^k \right) \right), \quad (12)$$

donde, Y_p es el rendimiento potencial, fijado a 19,5 t·ha⁻¹ (Martínez-Romero et al., 2017), K_y el coeficiente el coeficiente de respuesta de estrés del cultivo.

2.3.- El impacto de los parámetros hidráulicos del suelo

El mismo ejercicio se ha repetido, pero cambiando los parámetros hidráulicos del suelo. En este caso, no se han medido si no que se han utilizado parámetros hidráulicos teóricos de la base de datos interna que ofrece HYDRUS. Los datos de parámetros hidráulicos están basados en la función de edafo-transferencia Rosetta (Schaap et al., 2001). El suelo teórico utilizado corresponde a un suelo franco-arenoso.

3.- Resultados y discusión

3.1.- Parámetros hidráulicos

En la Tabla 1 se presentan los parámetros hidráulicos medidos y extraídos de la base de datos de HYDRUS. Si se analizan, por lo que hace al suelo de Foradada, tiene un valor de K_s bajo, haciendo que cuando el suelo está saturado, el flujo tendrá una velocidad baja. Por lo que hace al parámetro n de la curva de retención de humedad, que es su pendiente, evidencia que este suelo tiene una alta capacidad de retención de agua, ya que su pendiente es moderadamente baja. Por lo que hace al suelo franco – arenoso, muestra otras características contrarias. Su valor de K_s es importante, mientras que el parámetro n , muestra que el suelo tiene mucha menos capacidad de retención de agua que el suelo de Foradada.

Tabla 1. Parámetros hidráulicos medidos del suelo de la parcela de cultivo de Foradada y del suelo franco arenoso extraído de la base de datos de Hydrus.

Suelo	θ_r	θ_r	α (1/h)	n (-)	K_s (cm/d)	I (-)
Foradada	0,012	0,473	0,0678	1,186	12	0,5
Franco-arenoso	0,05	0,410	0,124	2,280	350	0,5

3.2.- Riego óptimo suelo de Foradada

En la Fig.1., se presentan los componentes del balance de agua resultantes de todas las estrategias de riego simuladas con el suelo de Foradada.

La Fig.1a representa el agua aplicada, donde se puede observar que, si hay que mantener el suelo en succiones más altas, como, por ejemplo -10 kPa, hay que aplicar más agua. Por lo contrario, si se aplica riego con menos frecuencia, como, por ejemplo, cuando el suelo está a -100 kPa, no es necesario aplicar tanta agua. Este fenómeno se acentúa cuando el t_{ir} cambia, es decir, se aplica más agua cuando se aplican riegos largos como de $4 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$, que cuando se aplican riegos cortos. En este caso, los resultados muestran que no es necesario aplicar agua durante varias horas, para mantener el suelo en condiciones húmedas o de succiones altas.

En la Fig.1b se representa el agua evaporada real (E_a) y la potencial (E_p). En este caso, existe un punto de inflexión que va en función de Ψ_{th} que describe una caída de la E_a . Esto puede explicarse con los estadios de evaporación descritos por Philip (1956) y Ritchie (1972), donde de -10 a -50 kPa, el estadio de 'energy limiting' es dominante, y de -50 a 100 kPa, lo hace el 'falling rate'.

En la Fig.1c se representa el agua drenada (D). En este caso, los resultados pueden ser relacionados con los resultados de agua aplicada, ya que como más horas de riego a succiones altas, más D se produce. Estos resultados pueden ser de utilidad en el caso de que haya problemas de salinidad del suelo.

Finalmente, la Fig.1d representa los resultados de la T_a y la T_p . Los resultados presentan distintos comportamientos en función, sobre todo de Ψ_{th} . Existe en rango de succión, entre -20 y -40 kPa, donde la T_a es muy cercana a T_p , satisfaciendo la demanda del cultivo. En contraste, a medida que la succión decrece y que se acerca al punto de saturación, la T_a decrece sustancialmente. Esto describe la función de estrés hídrico de Feddes utilizada en el modelo. Referente a t_{ir} , remarcar que modifica los resultados y que el patrón de transpiración se mantiene. Los resultados muestran que aplicar riego durante varias horas hace disminuir la T_a , hecho que se podría explicar con las propiedades hidráulicas presentadas anteriormente. Dada la baja K_s y n , puede hacer que, si se aplican riegos largos, el suelo se satura disminuyendo la T_a . El riego óptimo para el suelo de Foradada, en términos de T_a , sería cuando Ψ_{th} está alrededor de -20 a -40 kPa y t_{ir} es de $1 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$.

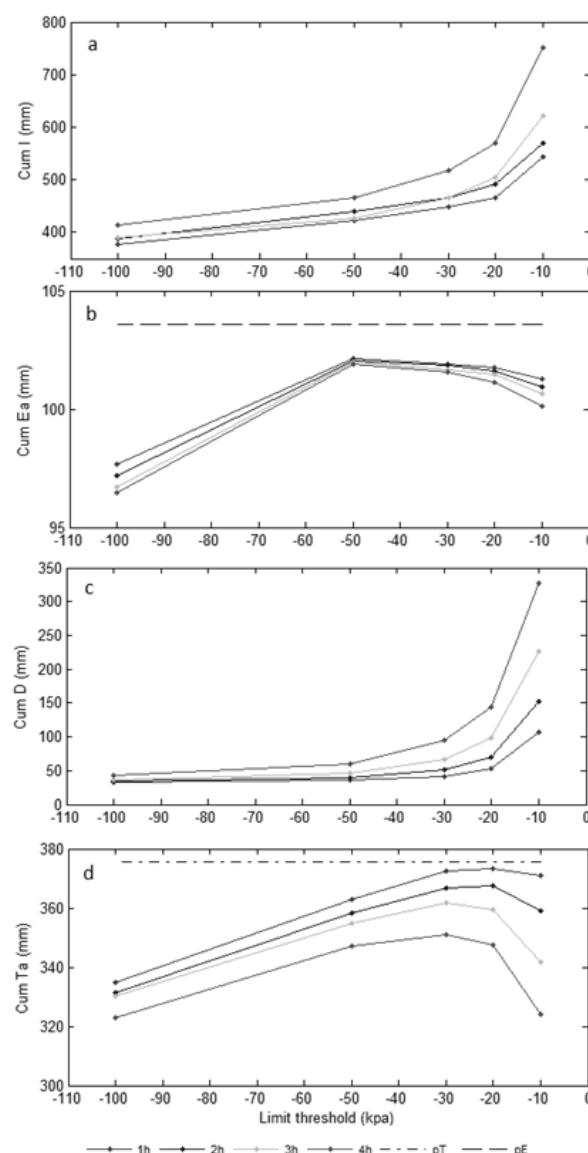


Fig. 1. Componentes del balance de todas las estrategias de riego simuladas con el suelo de Foradada. En el eje X, se representa Ψ_{th} definido previamente, mientras que en el eje Y hay representado el volumen de agua consumido por cada componente del balance y, finalmente, cada línea representa un t_{ir} distinto.

En la Fig.2 hay representados los elementos principales de la función objetivo para determinar el NM en el caso de Foradada.

La Fig. 2a representa los resultados de Y_a , que son muy similares a los resultados de T_a , con una transpiración máxima entre succiones de -20 a -40 kPa, y tiempos de riego de 1 o 2 $\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$. Estos resultados también son muy similares a los que refleja la Fig.2b que representa el GM. La razón es que solamente se ha multiplicado Y_a por C_y , haciendo los resultados proporcionales los unos con los otros.

La Fig.2c representa los gastos de O_{pex} , que pueden relacionarse con los resultados de agua aplicada. En este caso, se puede apreciar que, a succiones más altas

y tiempos de riego altos, los gastos relacionados con el riego aumentan.

Finalmente, la Fig.2d representa el NM. En este último caso, se puede apreciar que la estrategia que podría proporcionar más NM es cuando Ψ_{th} está alrededor de -40 kPa y los riegos son de t_{ir} 1 h·d⁻¹. Este riego óptimo difiere un poco del definido con los datos de T_a , esto puede ser explicado que los datos de O_{pex} condicionan al resultado final de NM, ya que, a succiones más altas, O_{pex} aumenta decreciendo NM.

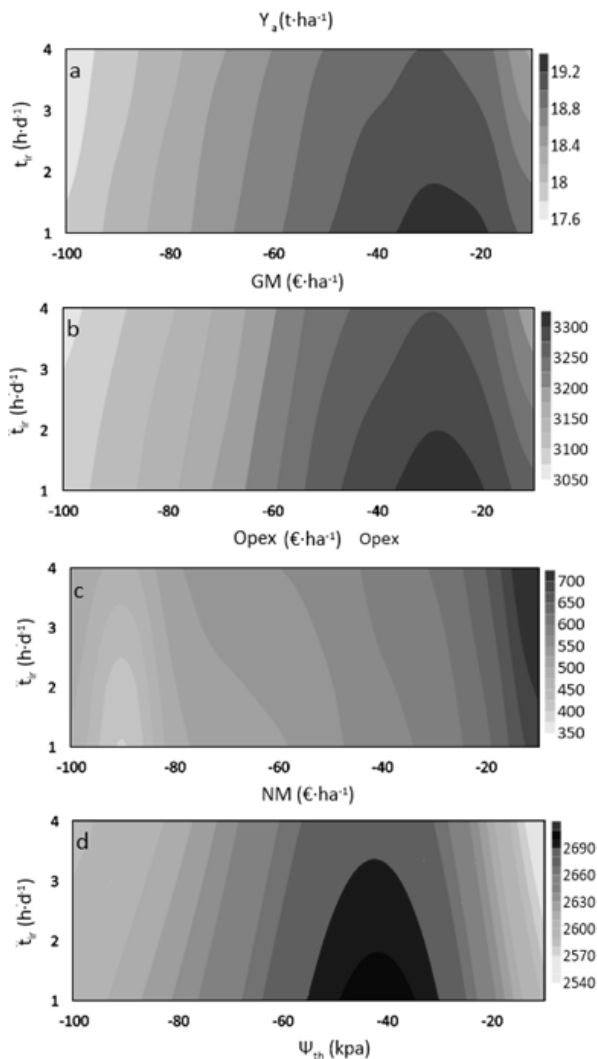


Fig.2. Elementos principales de la función objetivo para determinar el margen neto (NM). En el eje de las X hay representado Ψ_{th} , en el eje de las Y hay t_{ir} , mientras que los resultados están representados mediante un gráfico de contorno.

Todos los resultados analizados, muestran que el suelo de Foradada, dadas sus propiedades hidráulicas, requiere aplicar riegos moderadamente frecuentes y cortos. De este modo, el frente de humectación puede infiltrarse y redistribuirse en el perfil sin saturar por completo el suelo y llegando a la zona radicular.

3.3.- Riego óptimo suelo teórico

Los mismos resultados que en el suelo de Foradada se han graficado para poder comparar y demostrar si los parámetros hidráulicos modifican el riego óptimo.

El agua aplicada en este suelo (Fig.3a), se puede apreciar que a diferencia del suelo de Foradada, t_{ir} no modifica sustancialmente los resultados. Esto puede ser explicado que, por ejemplo, para mantener el suelo a una determinada succión, se puede aplicar agua durante 1 h·d⁻¹ 4 días consecutivos, que aplicar agua durante 4 h·d⁻¹ cada 4 días. Este comportamiento puede corresponder a un suelo sin problemas de infiltración y redistribución de la humedad dentro del perfil, permitiendo que riegos cortos sean capaces de humectar el punto que controla el riego.

El agua evaporada (Fig.3b), solamente presenta uno de los estadios descritos anteriormente. Este corresponde al de falling rate, correspondiente a que el agua es infiltrada en el perfil del suelo, alejándose de la superficie del suelo evitando la evaporación.

Por lo que hace a el agua drenada (Fig.3c), en muchas de las estrategias es casi nulo, excepto en succiones altas.

Finalmente, en el caso de T_a (Fig.3d), existe una T_a óptima entre -10 y -20 kPa, pero a partir de este punto, la T_a decrece de forma lineal. En este caso, a succiones altas la T_a no decrece, manifestando otra vez que en este suelo no se produce la saturación del suelo dada la buena redistribución de humedad.

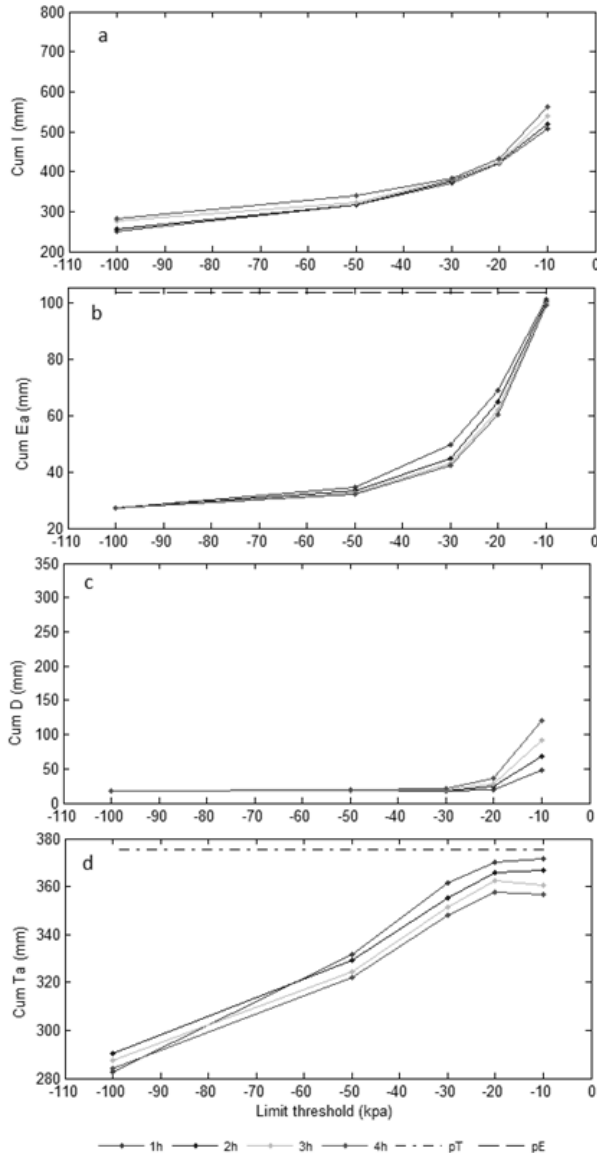


Fig. 3. Componentes del balance de todas las estrategias de riego simuladas con el teórico Franco – Arenoso.

En la Fig.4 hay representados los resultados del análisis económico para el suelo Franco – Arcilloso. Si se comparan los resultados con el suelo de Foradada, se observa que la principal diferencia es que t_{ir} no modifica sustancialmente los resultados de Y_a , GM, O_{pex} y NM, pero sí que lo hace Ψ_{th} . El máximo NM mostrado por la Fig.4d, es cuando Ψ_{th} es -10 kPa y los tiempos de riego son de 1 h·d⁻¹, o con otras palabras, la estrategia óptima sería aplicar riegos cortos y frecuentes.

En este caso, el suelo analizado requiere de riegos frecuentes y cortos por tal de obtener el máximo NM. Esto se debe a su moderada capacidad de retención de agua que produce que el suelo tenga una buena infiltración del agua y sin problemas para humectar la zona radicular.

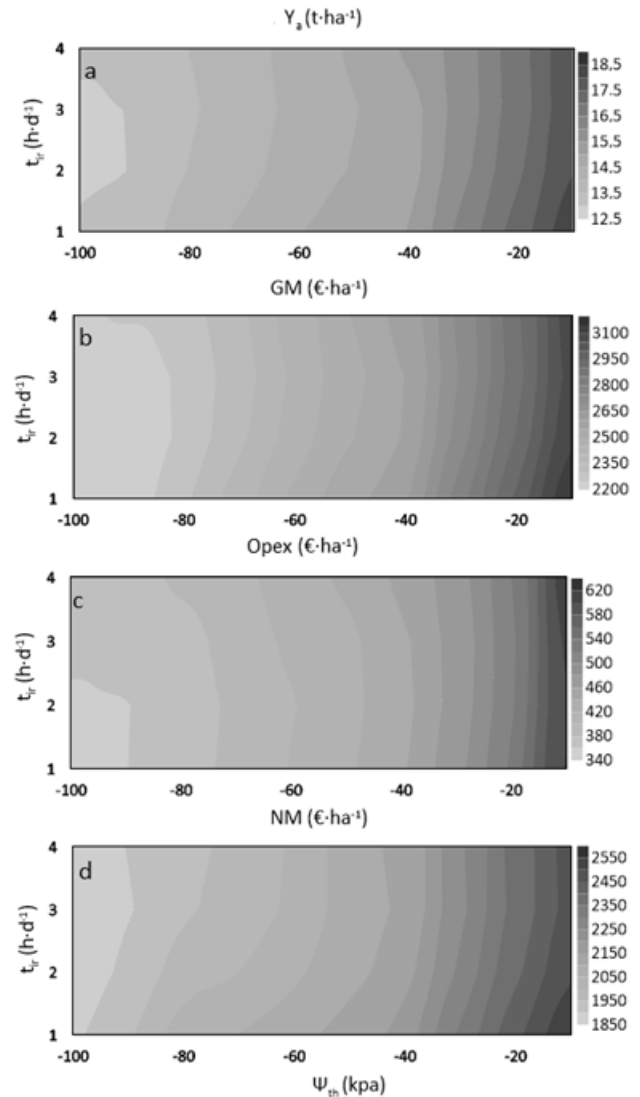


Fig.4. Elementos principales de la función objetivo para determinar el margen neto (NM) para el suelo teórico Franco – Arenoso.

4.- Conclusiones

En este trabajo se ha presentado una metodología que simula distintas estrategias de programación de riego y que es capaz de determinar cuál de ellas es la más óptima.

Se ha demostrado que, en función de la estrategia de riego, los componentes del balance de agua cambian haciendo una estrategia más o menos eficiente y sostenible.

Para poder aplicar una estrategia de riego óptima, hay que tener en cuenta las propiedades hidráulicas del suelo y entender cómo se mueve el agua en él. En los dos ejemplos presentados en este estudio, para el suelo de Foradada, el riego óptimo sería definido por Ψ_{th} , -40 kPa y t_{ir} a 1 h·d⁻¹, mientras que para el caso de un suelo franco – arenoso, sería de Ψ_{th} , -10 kPa y t_{ir} a 1 h·d⁻¹.

Agradecimientos. Queremos agradecer la buena disposición de Aigües Segarra i Garrigues (ASG) para ceder datos para completar este trabajo.

Bibliografía

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., Ab, W., 1998. Allen_FAO1998 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.12.001>
- Arbat, G., Puig-Bargués, J., Barragán, J., Bonany, J., Ramírez de Cartagena, F., 2008. Monitoring soil water status for micro-irrigation management versus modelling approach. *Biosyst. Eng.* 100, 286–296. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.02.008>
- Dabach, S., Lazarovitch, N., Šimůnek, J., Shani, U., 2013. Numerical investigation of irrigation scheduling based on soil water status. *Irrig. Sci.* 31, 27–36. <https://doi.org/10.1007/s00271-011-0289-x>
- Feddes, R.A., 1974. Uptake by Root Systems θ IK (O) O (hq-z) K (O) [hr -- h (z)] / b (z) 10.
- Martínez-Romero, A., Martínez-Navarro, A., Pardo, J.J., Montoya, F., Domínguez, A., 2017. Real farm management depending on the available volume of irrigation water (part II): Analysis of crop parameters and harvest quality. *Agric. Water Manag.* 192, 58–70. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.06.021>
- Philip, J.R., 1956. Evaporation, and soil moisture and heat fields in the soil. *J. Meteorol.* 14, 354–366.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E., 2017. AquaCrop 151.
- Richards, L.A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *J. Appl. Phys.* 1, 318–333. <https://doi.org/10.1063/1.1745010>
- Ritchie, J.T., 1972. Model for Predicting Evaporation from a Row Crop with Incomplete Cover. *Water Resour. Res.* 8, 1204–1213.
- Schaap, M.G., Leij, F.J., Van Genuchten, M.T., 2001. Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *J. Hydrol.* 251, 163–176. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00466-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00466-8)
- Schelle, H., Heise, L., Jänicke, K., Durner, W., 2013. Water retention characteristics of soils over the whole moisture range: A comparison of laboratory methods. *Eur. J. Soil Sci.* 64, 814–821. <https://doi.org/10.1111/ejss.12108>
- Šimůnek, J., van Genuchten, M.T., Šejna, M., 2016. Recent Developments and Applications of the HYDRUS Computer Software Packages. *Vadose Zo. J.* 15, 0. <https://doi.org/10.2136/vzj2016.04.0033>
- Šimůnek, J., van Genuchten, M.T., Šejna, M., 2008. Development and Applications of the HYDRUS and STANMOD Software Packages and Related Codes. *Vadose Zo. J.* 7, 587. <https://doi.org/10.2136/vzj2007.0077>
- Siyal, A.A., Skaggs, T.H., 2009. Measured and simulated soil wetting patterns under porous clay pipe sub-surface irrigation. *Agric. Water Manag.* 96, 893–904. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.11.013>
- Skaggs, T.H., Trout, T.J., Rothfuss, Y., 2010. Drip Irrigation Water Distribution Patterns: Effects of Emitter Rate, Pulsing, and Antecedent Water. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74, 1886. <https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0341>
- Stewart, J.I., Hagan, R.M., Pruitt, W.O., Hanks, R.J., Riley, P., J., Danielson, R.E., Franklin, W.T., Jackson, E.B., 1977. Optimising crop production through control Report, of water and salinity levels in the soil.
- Twarakavi, N.K.C., Sakai, M., Šimůnek, J., 2009. An objective analysis of the dynamic nature of field capacity. *Water Resour. Res.* 45, 1–9. <https://doi.org/10.1029/2009WR007944>
- van Genuchten, M.T., 1980. A Closed-form Equation for Predicting Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* <https://doi.org/doi:10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>