

Ground water extraction with minimum cost. Application to sprinkler irrigation systems with corn crop in Spain

Carrión F.¹, Sanchez Vizcaino J.², Carrión P.³, Tarjuelo J.M.⁴, Moreno M.A.⁵

¹ Agricultural Engineer. Regional Centre of Water Research (CREA). UCLM. Ctra. de las Peñas, km 3,2. 02071, Albacete. Fco.Carrión2@alu.uclm.es.

² PhD Geological Sciences. Civil Engineering Faculty. UCLM. Campus Universitario, Ciudad Real. Jesus.svizcaino@uclm.es

³ PhD Industrial Engineer. Industrial Engineering Faculty. UCLM. Campus Universitario s/n, Albacete. Pedro.Carrión@uclm.es

⁴ PhD Agricultural Engineer. Regional Centre of Water Research (CREA). UCLM. Ctra. de las Peñas, km 3,2. 02071, Albacete. Jose.Tarjuelo@uclm.es.

⁵ PhD Agricultural Engineer. Regional Centre of Water Research (CREA). UCLM. Ctra. de las Peñas, km 3,2. 02071, Albacete. MiguelAngel.Moreno@uclm.es.

Abstract

The optimum hydraulic design of a pressurized irrigation system is reached by determining the sizes of pump and distribution pipes that ensure proper flow and intake pressure head in the sprinkler or emitter, with minimum annual water application cost. Thus, the aim of this study is to apply the DSS tool named PRESUD (Pressurized Subunit Design) to obtain the minimum total water application cost (C_T) (energy (C_e)+ investment (C_a)) per unit irrigated area. An application to permanent sprinkler irrigation systems using ground water of two types of aquifer, with the tube-well in the centre of the plot, for corn crop in Spain is analyzed, evaluating the effects on C_T of parameters such the dynamic lift in the aquifer (DL), number of subunits (NS), irrigated area (S), sprinklers and laterals spacing or average application rate (ARa). C_{ws} crece con DL y disminuye con S. El tipo de acuífero condiciona sobre todo el coste de inversión necesario en el sondeo. Results show that the cost for transporting water from the source to the irrigation subunit inlet (C_{ws}) increases with DL and decreases with S. For the studied aquifers, the C_{ws} is mainly conditioned by the tube-well investment cost, being the confined aquifer 30-60% more expensive than the unconfined. The C_T decreases with S and increase with the DL, being the C_e the more important cost of C_T (65-70 % in the studied cases). PRESUD is a good tool to optimize the performance of water pumping facilities in irrigation systems.

Key words: sprinkler irrigation design, water application cost, energy cost.

1. Introduction

Irrigation consumes approximately the 70% of the fresh water in most of the areas in the world, reaching 90% in arid and semiarid areas (Molden, 2007). It plays a main role to guarantee the food production. In the other hand, between 23 and 48% of direct energy used for crop production is used for on-farm pumping (Singh et al., 2002). Efficient water and energy use take on greater importance in agriculture due to the widespread tendency of reduced water availability as a result of increasing water demands in other sectors, including for environmental integrity, and increasing energy costs, which determine the viability of irrigated agriculture in many areas of the world

(Rodríguez Díaz et al., 2007; Tarjuelo et al., 2010). For the improvement of the water and energy efficiency in irrigable areas is necessary transfer methodologies, models and analysis processes to final users and administration with the aim of improving the water and energy efficiency in irrigation.

Under this context, and collaborating with Universities and public or private enterprises, the Administrations of several regions where irrigation is an important factor in their economies have design and developed Irrigation Advisory Services (IAS). The IAS are one of the best tools to optimize the water and energy consumption, together with the rest of the productive inputs, which helps to make the irrigation a sustainable activity (Ortega et al., 2005). The IAS are also the link with farmers to transfer to them the technology and knowledge, allowing them to implement this advances into their productive systems. The system CIMIS (California Irrigation Management Information System) is a clear example of the success in the performance of these kind of services. Parker et al. (2000) estimated that with CIMIS water applied was reduced in a 10-20%, 23% of growers increased crop yield, and 28% of growers increased crop quality. From the economic point of view, operation cost of CIMIS was established in 850,000 \$ yr⁻¹ while the farmers profit was estimated in 64,200,000 \$ yr⁻¹.

Throughout the history of sprinkler and drip irrigation, there has always been interest in finding those system characteristics that yield the cheapest results with irrigation (Kumar et al., 1992; Lamaddalena et al., 2007). The cost of the sprinkler irrigation system depends on the equipment and its design, materials and automation level. This cost is also influenced by other factors such as shape, layout and size of the plot, distance from the water source to the plot and pumping requirements (Tarjuelo, 2005). Ortiz et al. (2006) report that the permanent sprinkler irrigation system is the cheapest solution for set sprinkler irrigation systems. The wide variety of design alternatives available makes it necessary to identify the lowest total cost, including investment and operation costs.

El coste de extracción de aguas subterráneas depende principalmente del tipo de acuífero y del nivel dinámico de bombeo (DL). La evaluación del coste de extracción de aguas subterráneas puede realizarse a partir del caudal específico q (**specific capacity**), (caudal extraíble por unidad de descenso en el nivel del agua ($\text{m}^3 \text{ día}^{-1} \text{ m}^{-1}$)), que se obtiene a partir de ensayos de aforo. Este parámetro está directamente relacionado con la eficiencia o rendimiento del pozo, que a su vez depende de su diseño constructivo y de su mantenimiento, así como de la permeabilidad (K , m día^{-1}) y transmisividad ($T = K H_s$, en $\text{m}^2 \text{ día}^{-1}$, siendo H_s el espesor saturado del acuífero en m) (Custodio and Llamas, 1983). Estos parámetros normalmente son variables de unos puntos a otros ya que los acuíferos, aunque pueden ser homogéneos, no suelen ser isótropos, por ello es necesario manejar un rango de valores y analizar varias alternativas.

The optimum hydraulic design of a sprinkler irrigation system is reached by determining the sizes of pump and distribution pipes that ensure proper flow and intake pressure head in the sprinkler, with minimum annual water application cost. Thus, the aim of this study is to apply the DSS tool named PRESUD (Carrión et al., 2013) to obtain the minimum total water application cost (C_T) (operation (C_{op}) + investment (C_a)). An application to permanent sprinkler irrigation systems using groundwater in two types of aquifer, with the tube-well in the centre of the plot, for corn crop in Spain is analyzed, evaluating the effects on C_T of parameters such the dynamic lift in the aquifer (DL), number of subunits (NS), irrigated area (S), sprinklers and laterals spacing or

average application rate (ARa). The proposed tool can be applied to any other case. All the data assumed for the case studies can be modified in the tool to fit the requirements of any case study

2. Methodology

PRESUD tool was developed using MATLABTM, optimizing the shape of the characteristic and efficiency curves of the pump and the pumping and distribution pipe with a holistic approach. The tool has been applied in the design of rectangular subunits of permanent sprinkler irrigation systems, with the tube-well in the centre of the plot because this layout leads to lower investment costs (Fig. 1). The lateral and manifold pipes are previously calculated using a stepwise method in Carrión et al. (2013). However, the tool allows for optimizing the design of sprinkler irrigation systems with different topologies

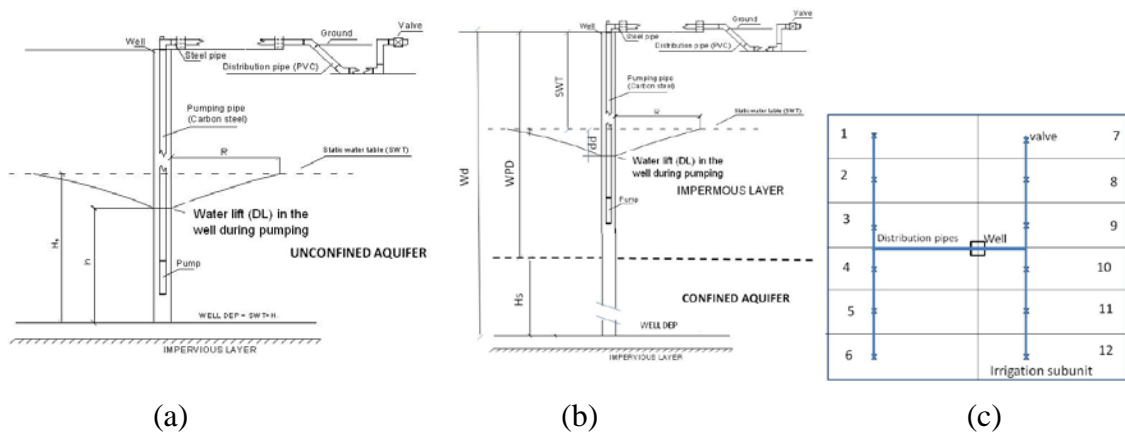


Figure 1. Scheme of the infrastructure of the sprinkler irrigation system: (a) unconfined aquifer; (b) confined aquifer; (c) tube-well location in a plot with twelve irrigation subunits sloping.

Since the distribution pipes used are made of smooth material (polyvinylchloride (PVC)), and the diameters are small, the Veronesse-Datei (Eq. 1, S.I. units) (Reynolds number $Re < 10^6$) head loss equations have been used for the hydraulic calculations. For steel pipes, for pumping in the tube-well, the Hazen-Williams equation (Eq. 2, S.I. units) is used.

$$h_f = 0.0099 \nu^{0.172} D^{-4.8} Q_o^{1.8} L \quad (1)$$

$$h_f = 10.62 C^{-1.85} D^{-4.87} Q_o^{1.85} L \quad (2)$$

where: h_f = pipe head loss (L); ν = water kinematic viscosity ($L^2 \cdot T^{-1}$); D = inner diameter of pipe (L); Q_o = inflow rate to the pipe ($L^3 \cdot T^{-1}$); L = pipe length (L); C = friction coefficient ($C = 115$ for steel pipe in the case study)

Minor singular head losses (h_s) are considered to comprise 15% of h_f in the distribution pipe network and pumping pipe.

2.1. Tipos de acuíferos estudiados y sus propiedades hidrogeológicas.

Para analizar el coste de extracción de aguas subterráneas se han elegido dos grandes acuíferos de Castilla la Mancha (Fig. 2) donde se concentran más de 430.000 ha de regadío (PNR, 2008). Una es la unidad hidrogeológica 04.04 (UH 04-04) or Western

Mancha, que se localiza en la cuenca alta del río Guadiana, con una extensión de más de 5,500 km² y más de 320,000 ha de regadío. Dentro de ella, se ha elegido la Masa de Agua Mancha Occidental II (MAMO II), al norte de Manzanares, en la provincia de Ciudad Real, Spain (Fig.2). La segunda es la U.H. 08.29 or Eastern Mancha, con una extensión de 7,260 km² y más de 110,000 ha regadas. Dentro de ella se ha elegido el Dominio Central (DC), que ocupa unos 3,600 km² (Sanz et al., 2009) alrededor de la ciudad de Albacete (Fig.2).



Fig. 2. Distribution of the irrigated lands in Castilla-La Mancha and the main aquifers in the region (PNR, 2008).

La UH 04.04 es un acuífero libre y de poco espesor, entre 100 y 200 m, con un rendimiento de extracción de agua medio-alto. En la MAMO II se diferencian dos acuíferos superpuestos: el superior formado por materiales del Terciario y del Cuaternario, y el inferior formado por materiales Mesozoicos. Los depósitos Mesozoicos están constituidos por calizas, dolomías, gravas y areniscas depositados sobre materiales arcillosos y yesíferos triásicos que forman la base de baja permeabilidad. Tienen espesores medios entre 145 y 315 m. El acuífero superior está formado por depósitos detríticos, calizas, calizas margosas y localmente rañas. El acuífero principal está formado por las calizas miocenas, con espesores de hasta 130 m en el centro de la cuenca (Ramírez et al., 1988).

La evolución piezométrica de la MAMO II (Fig. 3) presenta en los últimos años una fuerte recuperación respecto a los niveles de las dos últimas décadas, tras ser declarado sobreexplotado en 1997 y haberse desarrollado el Plan Especial de Alto Guadiana desde 2004. En el periodo actual, Enero de 2009 a Mayo de 2013 se observa una clara tendencia de recuperación, aunque con oscilaciones de los niveles debidas a las extracciones durante la temporada de riegos (junio a septiembre), con caídas en los años más secos en torno a los 5 m, y la posterior recuperación durante los meses de noviembre a abril.

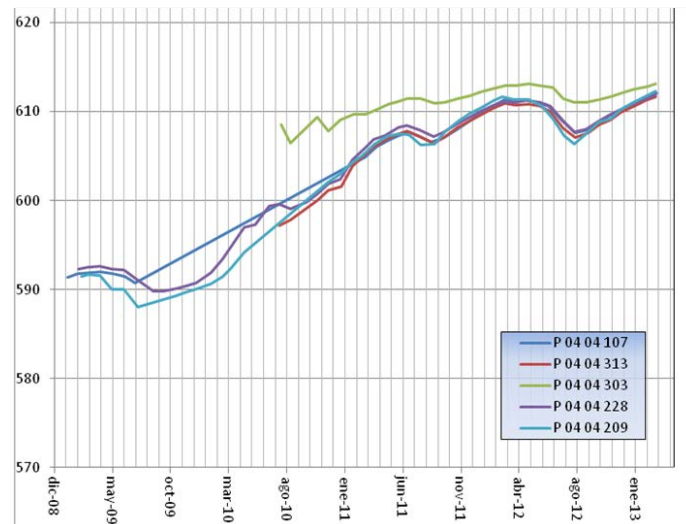


Fig. 3. Evolución piezométrica de la MAMO II para el periodo comprendido entre enero 2009 y mayo del 2013

La UH 08.29 es un acuífero confinado y profundo, con 300-600 metros de espesor y de alto rendimiento. Los materiales que constituyen el DC en la UH 08.29 forman un acuífero multicapa compuesto de una mezcla de materiales carbonatados separados por unidades hidrogeológicas de comportamiento acuitardo o acuicludo de naturaleza detrítica. La UH más importante a nivel local y regional es la UH 7, (Acuífero del Jurásico Medio (Middle Jurassic Aquifer), que está compuesta de dolomitas y calizas oolíticas, marrones o rojizas, fracturadas y karstificadas, que pueden tener valores de transmisividad (T) iguales o superiores a $30,000 \text{ m}^2\text{día}^{-1}$. La base de esta unidad está situada a una profundidad media de 550 m, cota 145 sobre el nivel del mar (Sanz et al., 2009). Como ejemplo, la evolución piezométrica de la zona (Fig. 4) presenta una estabilización de los niveles para el periodo 2008 a 2013, aunque los registros muestran las afecciones producidas por los conos de depresión de los pozos de bombeo. Este fenómeno refleja los efectos de las extracciones de agua subterránea sobre los niveles piezométricos durante la temporada de riegos (de mayo a septiembre), con caídas en tono a los 5 m, y la posterior recuperación durante los meses de noviembre a abril (Sanz et al., 2009).

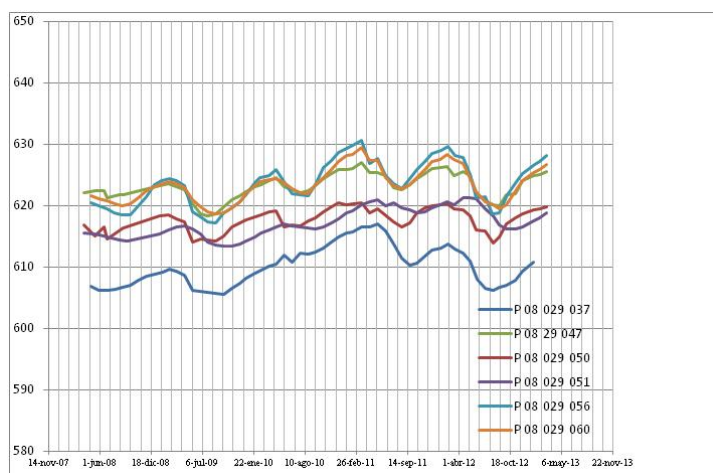


Fig. 4. Evolución piezométrica en la zona del Dominio Central (DC) para distintos piezómetros (P).

For permanent operating conditions, the specific discharge (q) of a tube-well located at a unconfined aquifer and in steady state was estimated with the simplified Eq. 3, and the saturated depth of drilled aquifer after pumping (h , in m, in Fig. 1) with the simplified Eq. 4 (Custodio and Llamas, 1983).

$$\frac{Q}{4\pi T H_s} = \frac{dd}{R^2} \quad (3)$$

$$h = H_s - \frac{Q}{4\pi T H_s} \quad (4)$$

Donde q = caudal específico ($\text{m}^3 \text{día}^{-1} \text{m}^{-1}$), Q = caudal bombeado del acuífero ($\text{m}^3 \text{día}^{-1}$), dd = descenso teórico en el pozo (m), T = transmisividad del acuífero ($\text{m}^2 \text{día}^{-1}$); D_{wp} = diámetro interno del entubado del sondeo (m); R = radio del cono de influencia (m); H_s = espesor saturado del acuífero before pumping (m) (with static water table (SWT) (Fig. 1).

where q = specific capacity ($\text{m}^3 \text{día}^{-1} \text{m}^{-1}$), Q = system flow from the aquifer ($\text{m}^3 \text{día}^{-1}$); dd = theoretical drawdown in the well (m); T = transmissivity of the aquifer ($\text{m}^2 \text{day}^{-1}$), D_{wp} = inner diameter of well pipe (m); R = the radius of the cone of influence (m); H_s = saturated depth of aquifer before pumping (with static water table (SWT) (Fig. 1)

For permanent operating conditions, the specific capacity (q) of a tube-well located in a confined aquifer and in steady state was estimated with the simplified Eq. 5

$$q = \frac{Q}{4\pi T H_s} \quad (5)$$

The dynamic lift (DL) is the depth to the SWT plus the drawdown ($DL = SWT + dd$, this calculated from Eq. (5)) (Fig. 1).

De acuerdo con las Eqs.3 y 5 el caudal específico teórico (q) es independiente del caudal extraído (Q) y solo depende de las características del acuífero y del diámetro interno del entubado del sondeo (Custodio and Llamas, 1983). El caudal específico real es siempre menor que el teórico ya que los descensos reales durante el bombeo son mayores que en el resto del acuífero debido a las pérdidas de carga en el sondeo. Estas pérdidas de carga definen la eficiencia o rendimiento del sondeo, que depende de su diseño constructivo (diámetro de sondeo, longitud, tamaño de las ranuras de los tramos filtrantes o rejillas y su situación, tamaño y espesor de la corona anular de grava, etc.), grado de desarrollo y de su mantenimiento (grado de obturación de las rejillas, obstrucciones locales, etc.) (Custodio and Llamas, 1983). Por todo ello no puede determinarse una relación general entre el caudal específico de un sondeo (q) y la transmisividad del acuífero (T). No obstante puede establecerse una relación estadística entre ambos parámetros para un determinado acuífero, deduciéndose los valores de q a partir de los de T o K , más fáciles de calcular (Csallany, S. 1965; Sanz et al., 2009). Para realizar una estimación de q a partir del valor de transmisividad del acuífero, Custodio and Llamas. (1983) proponen una relación del tipo $q = T c^{-1}$, siendo c un coeficiente que varía entre 1 y 1,14 en función del diámetro del sondeo, para caudales expresados en unidades homogéneas (q en $\text{m}^3 \text{día}^{-1} \text{m}^{-1}$ y T en $\text{m}^2 \text{día}^{-1}$). No obstante, en

este estudio se ha preferido utilizar las ecuaciones teóricas, utilizando los valores de los principales parámetros hidrológicos de los dos tipos de acuíferos seleccionados que se recogen en la Table 1.

Tabla 1. Resumen de datos hidrogeológicos medios considerados en los acuíferos utilizados para el estudio

Concept		HU 04-04	HU 08-29
Seasonal drawdown (S_d) (m)		5	5
T ($m^{-2} day^{-1}$)	Minimum	300	700
	Medium	500	5,000
	Maximum	700	16,000
R (m)		800	1,500
Well depth (W_d) (m)	$Q \leq 40 L s^{-1}$	100	400
	$40 < Q \leq 80 L s^{-1}$	125	450
	$Q > 80 L s^{-1}$	150	500
Saturated depth of aquifer before pumping H_s (m)		$H_s = W_d - SWT$	$H_s = W_d - WPD^{(1)}$
Pump depth (P_d) (m)		$P_d = SWT + dd + 15$	
Inner diameter of well pipe (D_{wp}) (m)		$D_{wp} \geq$ maximum external diameter of pump and/or flanged pumping pipes + 100 mm	
Drilling diameter (D_d) (mm)		$D_d \geq D_{wp} + 2 \times$ well pipe thickness + 50 mm	

(1) WPD = waterproof depth in the top of confined aquifers (m) (it is considered 350 m in this study).

2.2. Model design. Objective function and optimization variables

Figure 5 summarizes the optimization process implemented in the extended version of PRESUD tool. The optimization variables were head flow rate (Q), coefficient of the characteristic curve (c) (see next section), pumping pipe diameter (D_p), and the distribution pipe diameter (D). The optimization process was carried out using the Downhill Simplex Method (Nelder and Mead, 1965), which aims to minimize the total cost.

$$\text{MIN}(C_a + C_m + C_e) \quad (6)$$

where C_a = annual investment cost, C_m = annual maintenance cost, and C_e = annual energy cost. All costs are considered per unit area (€ha^{-1}).

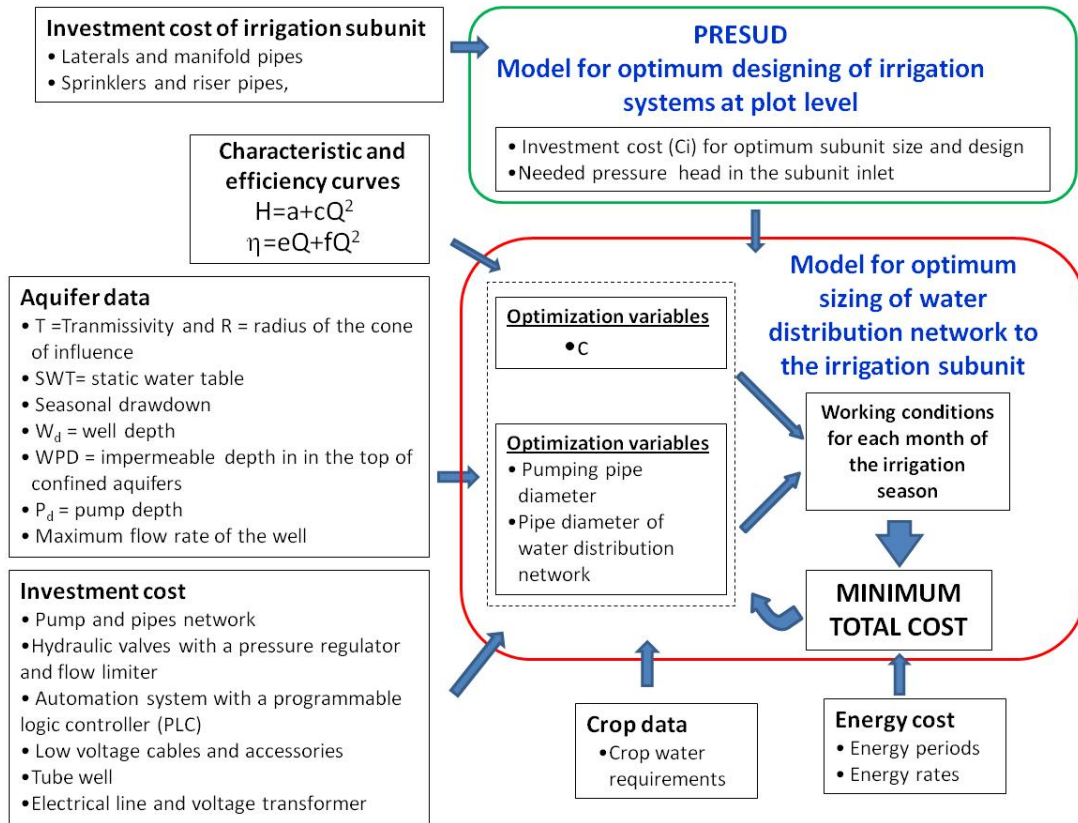


Fig 5. Diagram of the optimization process

To select the optimum pump to minimum C_T for powering the irrigation system directly from the tube-well, the software must consider the shape of the characteristic (Q-H) and efficiency (Q- E_p) curves (Moreno et al., 2009), as well as the optimum sizing of the pump pipe and the distribution pipe for each specific type of aquifer. These variables will determine the energy efficiency of the whole system through the irrigation season and fit it to varying conditions of the aquifer. This methodology was based on the theoretical relations between the characteristic and efficiency curves and it considered different variables such as: hydrologic, topographic, hydraulic, and economic variables (Moreno et al., 2010).

2.3 Investment costs

The investment costs (C_i) considered were: well drilling and well pipe, pump, electrical line and voltage transformer for using conventional electrical energy, pipe and assembly costs (laterals, manifold and distribution (PVC), and well pumping pipes (steel), sprinkler, riser pipes, opening and closing of ditches, hydraulic valves with a pressure regulator and flow limiter for each irrigation subunit, the automation system with a programmable logic controller (PLC), the low voltage cables and accessories.

The investment annuity ($A = CRF C_i$, in €yr^{-1}) for the total investment cost (C_i , in €) was computed considering a useful life (N) of 12 years for pump and 24 years for pipes, tube-well, electrical line, valves, electrical line, voltage transformer (Scherer and Weigel 1993), and an interest rate (i) of 0.05. The capital recovery factor (CRF) and the investment annuity per unit of irrigated area (C_a , en $\text{€ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$) were calculated using equations (7) and (8):

$$CRF = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (7)$$

$$C_a = \frac{A}{S} = \frac{CRF \cdot C_i}{S} \quad (8)$$

where S is the area irrigated by the irrigation system (in ha).

To determine the total investment cost (C_i), the average prices of equipment from different manufacturers and distributors in Spain were considered (Table 2).

Table 2. Average prices of different manufacturers and distributors in Spain

Concept	Material	Cost (€unit ⁻¹)	R ²
Distribution pipe	PVC 0.6 MPa	$C = 0.001253D^{1.632397}$	0.99
Pumping pipe	Steel	$C = 0.0009D^{1.8013}$	0.99
Hydraulic valves	Cast iron	$C = 0.017385D^2 + 0.010499D - 26.648651$	0.99
Pump		$C = 0.0016 P_p^3 + 0.924 P_p^2 + 268.28P_p$	0.94
Electrical wire	Cooper	$C = 0.0025318P_p^2 + 0.0823262P_p + 5.7296411$	0.99
Electrical panel		$C = 224.418612P_p^{0.329085}$	0.99
Electronic starter		$C = -0.023988P_p^2 + 25.423305P_p + 758.163174$	0.98
Controller and auxiliary		$C = 800$ (€)	
Voltage transformer		$C = 0.012140P_t^2 + 9.699422P_t + 4051.880598$	0.97

D= inner pipe diameter (mm); P_t= power of the transformer (kVA); P_p= power of the pump (kW)

The considered cost of well drilling in the area is included in Table 3. These costs also include the costs of transportation and installation of machinery, project and restoration. El diámetro interno de la entubación, normalmente de acero soldado, debe ser al menos 100 mm superior al de la bomba y/o la tubería de impulsión que aloja en su interior, con sus correspondientes bridas de unión. En cualquier caso, la velocidad de circulación del agua en el entorno de la bomba debe estar comprendida entre 0.5 y 3,5 m/s. Los diámetros comerciales para la entubación de pozos suelen fabricarse a incrementos de 50 mm. El espesor de la tubería se indica en la Tabla 4 para profundidades inferiores a 200 m. Para profundidades superiores se tomará el espesor de chapa inmediatamente superior al indicado en la Tabla 4.

Table 3. Cost of well drilling

CONCEPT	Drilling type	Well depth (W _d) (m)	Drilling diameter (D _d) (mm)						
			350	400	450	500	550	600	650
Well pipe, inner diameter (D _{wp}) (mm)			250	300	350	400	450	500	550
Average cost (€m ⁻¹)	P ⁽¹⁾	W _d <250	165	198	225	248	264	286	308
	RC ⁽²⁾	250<W _d <600	205	215	223	228	232	237	245

(1) P = Percussin; (2) RC= Reverse Circulation

Table 4.- Espesores mínimos recomendables para entubaciones de pozos con chapa de acero al carbono y profundidades menores de 200 m.

Inner diameter (mm)	Thickness (mm)
Until 350	5
Between 350-500	6
Greater than 500	7-8

Para determinar el diámetro de perforación (D_d), se ha considerado: a) para terrenos detríticos, 200 mm por encima del diámetro externo del entubado del pozo (ya que es

preciso ubicar un empaque de 100 mm de gravas); b) para terrenos fisurados o karstificados, como en nuestro caso, se elige un diámetro al menos 50 mm superior al diámetro de entubación para sondeos poco profundos. Este diámetro debe ser mayor conforme aumenta la profundidad del pozo para poder realizar correctamente la entubación telescópica del mismo.

Teniendo en cuenta lo anterior, el coste del sondeo se ha dividido en tres partes. De arriba a abajo son las siguientes:

- Cámara de bombeo. Corresponde con los primeros 150 m. Su coste se ha calculado en función del caudal bombeado y del tipo de perforación.
- En acuíferos confinados, el tramo desde 150 a 350 m en nuestro caso, que atraviesan el resto de la capa no productiva o impermeable. Se utilizan un $D_d = 400$ mm, entubados en 350 mm y espesor de 8 mm.
- Tramo de acuífero desde el 350 al 500 m. Se perfora con $D_d = 350$ y se entuba en 320 mm y espesor de 8 mm.

El coste total del metro lineal es la suma de los tres tramos divididos por la longitud del sondeo. Dada que hay dos tramos iguales en todos los sondeos y que solo cambia la parte superior, los costes por metro lineal son muy parecidos.

The considered cost of electric line is included in Table 5. The electrical line length is considered 500 m plus half square side assigned to each plot size, since the tube-well and the pump are located in the centre of the plot (Fig. 1).

Table 5 Cost of electric line

	Plot area (ha)			
	< 10	10 to 20	20 to 40	40 to 60
Cost of electric line (€km ⁻¹)	4550	6500	7800	8500

Carrión et al. (2013) report the typical permanent sprinkler irrigation subunit design of minimum cost as function of the subunit size for corn crop. In this case only the identified option of lower cost (Table 6, 7 and 8) are been considered.

Table 6. Values of the different parameter related with the sprinkler irrigation system considered in this study.

Spacing of sprinklers (m x m)	h_a (kPa)	E_a (dimensionless)	AR_a (mm h ⁻¹)	Diameter of nozzles (mm)	Corn gross water requirement (m ³ ha ⁻¹ yr ⁻¹)
18 x 18	300	0.77	5.90	4,8+2.4	8,249
	350	0.79	6.33	4,8+2.4	8,049
15 x 15	350	0.82	8.00	4,4+2.4	7,766

h_a = Average sprinkler working pressure = average pressure head in the subunit (kPa); E_a = general application efficiency for the irrigation system (Keller and Bliesner 1990); $AR_a = q_a (s_s s_l)^{-1}$ average application rate of the irrigation system (mm h⁻¹); q_a = average emitter flow in the subunit (L h⁻¹); s_s = sprinkler spacing in the lateral (m); s_l = lateral pipe spacing (m)

Table 7. Investment cost (C_i) of a permanent sprinkler irrigation subunit with 18m x 18 m spacing for minimum total cost C_T (Carrión et al. 2013) as function of the subunit area, including the diameter and length of lateral and manifold pipes, H_0 , EU, Δq and Δh values.

Subunit area (ha)	Lateral length (m)	Manifold length (m)		C_i (€ha ⁻¹ yr ⁻¹)	H_0 (m)	EU (%)	Δq (%)	Δh (%)
	Lateral external (inner) diameter (mm)	Manifold external (inner) diameter (mm)						
	50 (46.4)	140 (131.8)	160 (150.6)					
Sprinkler spacing 18m x 18m, $h_a = 300$ kPa and $AR_a = 5.9$ mm h ⁻¹								
1.56	198	54		86.4	35	95.9	4.2	8.4
2.33	198	90		87.8	35.1	95.9	4.4	8.8
3.11	198	126		88.6	35.4	95.7	4.7	9.5
3.89	198	162		89.0	35.8	95.5	5.4	10.8
4.67	198	198		89.3	36.3	95.3	6.3	12.8
5.44	198	234		89.5	37.1	94.9	7.7	15.5
6.22	198		270	94.0	36.6	95.1	6.9	14.0
7.00	198		306	94.2	37.2	94.8	8.1	16.4
7.78	198		342	94.3	38.0	94.4	9.5	19.4
Sprinkler spacing 18m x 18m, $h_a = 350$ kPa and $AR_a = 6.33$ mm h ⁻¹								
1.56	198	54		86.4	40.4	96.0	4.1	8.2
2.33	198	90		87.8	40.5	95.9	4.2	8.5
3.11	198	126		88.6	40.8	95.8	4.6	9.3
3.89	198	162		89.0	41.2	95.6	5.2	10.5
4.67	198	198		89.3	41.8	95.3	6.2	12.5
5.44	198	234		89.5	42.7	95.0	7.5	15.1
6.22	198		270	94.0	42.1	95.2	6.7	13.6
7.00	198		306	94.2	42.8	94.8	7.9	16.0
7.78	198		342	94.3	43.7	94.4	9.3	18.9

H_0 = pressure head required at the inlet of the irrigation subunit (m); EU= sprinkler emission uniformity (Keller J, Bliesner R D (1990); Δq = difference in extreme sprinkler flow in the irrigation subunit (% of q_a); Δh = difference in extreme pressure heads in the irrigation subunit (% of h_a); h_a = average pressure head in the subunit (m).

Table 8. Investment cost (C_i) of a permanent sprinkler irrigation subunit with 15m x 15m spacing for minimum total cost C_T (Carrion et al. 2013) as function of the subunit area, including the diameter and length of lateral and manifold pipes, H_0 , EU, Δq and Δh values.

Subunit area (ha)	Lateral length (m)	Manifold length (m)		C_i (€ha ⁻¹ Y ⁻¹)	H_0 (m)	EU (%)	Δq (%)	Δh (%)
	Lateral external (inner) diameter (mm)	Manifold external (inner) diameter (mm)						
	50 (46.4)	140 (131.8)	160 (150.6)					
Sprinkler spacing 15m x 15m, $h_a = 350$ kPa and $AR_a = 8.0$ mm h ⁻¹								
1,26	195	45		110.9	40.3	95.9	4.3	8.6
1,89	195	75		112.4	40.5	95.9	4.4	8.9
2,52	195	105		113.2	40.7	95.8	4.7	9.6
3,15	195	135		113.6	41.1	95.6	5.3	10.7
3,78	195	165		113.9	41.6	95.4	6.1	12.3
4,41	195	195		114.1	42.3	95.0	7.3	14.8
5,04	195		225	118.8	41.9	95.3	6.6	13.3
5,67	195		255	119.0	42.5	95.0	7.6	15.4
6,3	195		285	119.1	43.3	94.6	8.8	17.9

Las ecuaciones del coste de inversión (C_i) de una subunidad de riego optima (con mínimo coste total (C_T) (Carrion et al. 2013)) en función de su tamaño para los diferentes marcos de riego y AR_a se incluyen en la Figure 6. La aparición de dos tramos con ecuaciones distintas es debida al cambio en el diámetro de la tubería terciaria (Tables 7 and 8).

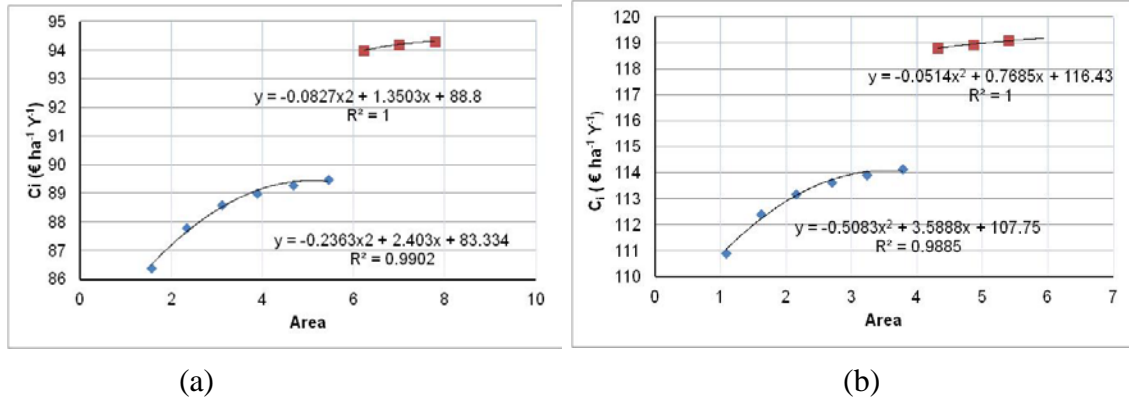


Fig. 6. Ecuaciones de coste de inversión (C_i) de una subunidad de riego en función de su tamaño para: (a) marco 18x18 con $ARa = 5.9$ and 6.3 mm h^{-1} ; (b) marco 15x15 con $ARa = 8.0 \text{ mm h}^{-1}$.

2.4 Energy costs

The annual operation costs (C_{op}) can be calculated with Eqs.(9) and (10).

$$C_{op} = \text{Power access} + \text{Energy consumption} \quad (9)$$

$$C_{op} = \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^k (N_p)_i Pa_{ij} + \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^k (N_p)_i Ot_{ij} P_{ij} \quad (10)$$

where N_p = power absorbed for irrigation water application (kW); Ot = monthly operation time of the pump (h); Pa = power access price ($\text{€kW}^{-1} \text{ month}^{-1}$); P = energy rate ($\text{€kW}^{-1} \text{ h}^{-1}$); i and j refer to the month and the different time-of-use energy rate periods (k), respectively.

The N_p was calculated according to the pressure head (H , in m) and flow rate (Q_{0s} , in $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$) necessary for the proper operation of the least favourable sprinkler irrigation subunit:

$$N_p = \frac{9.81 \cdot Q_{0s} \cdot H}{E_p} \quad (11)$$

where E_p = efficiency of pumping system (decimal).

The pressure head (H) can be obtained with the equation (12):

$$H = DL + h_f + h_s + H_{su} \quad (12)$$

where H_{su} pressure head required at inlet of the valve located in the origin of subunit, equal to the H_0 value of Tables 7 y 8 increased in 3 m for considering the head losses in the valve.

The number of operating hours per month (Ot) was calculated from the monthly distribution of net crop irrigation water requirement (R_n) (Table 9) and the optimum flow rate (Q) obtained in the optimization process.

Table 9. Monthly distribution of net irrigation water requirement (R_n) for corn crop in the Albacete area, Spain.

Crop	Monthly net crop irrigation water requirement ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$)						
	April	May	June	July	August	September	Annual (R_n)

Corn	113.4	580.2	1096.4	2112.0	2058.0	540.0	6500.0
------	-------	-------	--------	--------	--------	-------	--------

The gross crop irrigation water requirement (R_g) for the subunit can be calculated with Eq.(13):

$$R_g = \frac{R_n}{E_a} \quad (13)$$

where R_n = net corn crop irrigation water requirement ($m^3 \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) (Martin de Santa Olalla et al. 2003); E_a = general application efficiency for the irrigation system (Table 6)

In the case studies, located in Spain, the energy rates of this country are utilized. For these energy rates, the available hours in each period considered are described in Table 10. The distribution of high, medium, and low energy rate times is detailed by the electrical company in a complex schedule. It can be simplified in three energy rate periods: P1) high energy rate period (6 h day⁻¹), P2) medium energy rate period (10 h day⁻¹), and P3) low energy rate period, at night (0:00 to 8:00 am). The energy rates for each period are detailed in Table 11.

Table 10. Monthly hours of each energy rate period

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
High (P1)	186	168	186	180	186	180	186	186	180	186	180	186
Medium (P2)	310	280	310	300	310	300	310	310	300	310	300	310
Low (P3)	248	224	248	240	248	240	248	248	240	248	240	248

Table 11. Energy rates of power access and energy consumption

Energy rate period	Power access (Pa) (€kW ⁻¹ yr ⁻¹)	Energy (P) (€kWh ⁻¹)
High (P1)	24.49	0.13544
Medium (P2)	15.10	0.12010
Low (P3)	3.46	0.07562

To consider the possibility that energy prices will change due to the general rate of inflation, Eq. (14) (Keller and Bliesner, 1990) has been implemented in the tool.

$$EAE = \left[\frac{(1+e)^n - (1+i)^n}{(1+e) - (1+i)} \right] \cdot \left[\frac{i}{(1+i)^n - 1} \right] \quad (15)$$

where e= annual rate of escalation in energy costs (0.05 in this study, realizando además un análisis del efecto en C_T de valores de e= 0.10 y 0.15).

The annual energy cost per irrigated area (C_e , €ha⁻¹yr⁻¹) is calculated by dividing the operation cost (C_{op}) by the irrigated area (S , in ha).

2.5 Maintenance costs

An additional average cost of 5% above investment costs was considered for the maintenance needs of the irrigation system (C_m), to reach a useful life (N) of 12 years for pump and 24 years for pipes, tube well, electrical line, valves, electrical line, voltage transformer.

3. Results

Dado que sería la situación más favorable, y por tanto de mínimo coste, se ha considerado en todos los caso que se trata de una parcela llana.

3.1 Effect of the number of subunits (NS) on total cost (C_T)

En la Figura 7 se muestra la variación del C_T según el NS en parcelas de distinto tamaño, para un SWT= 60m en la UH 04-04 (acuífero libre) con distintos marcos de riego.

Para el caso del marco 15m x 15m (15x15) (Fig. 7a), el C_T mínimo se obtiene para 15 subunidades, lo que permite aprovechar la mayor parte de las horas valle (P3) y llano (P2). Para el marco 18x18 (Fig. 7b) el C_T mínimo se obtiene para 6 y 12 subunidades. No obstante, la opción de 6 subunidades tiene el problema de que ocupa solo las horas valle (periodo P3), pero casi en su totalidad durante los meses de mayores necesidades de riego (julio y agosto), lo que conlleva el riesgo de tener que consumir energía en periodo llano (P2) en caso de avería, lo que aumentaría significativamente el coste energético en caso de no tenerlo previamente contratado. El aumento del C_T para 15 subunidades (Fig. 7b) se debe a tener que utilizar horas punta (P1).

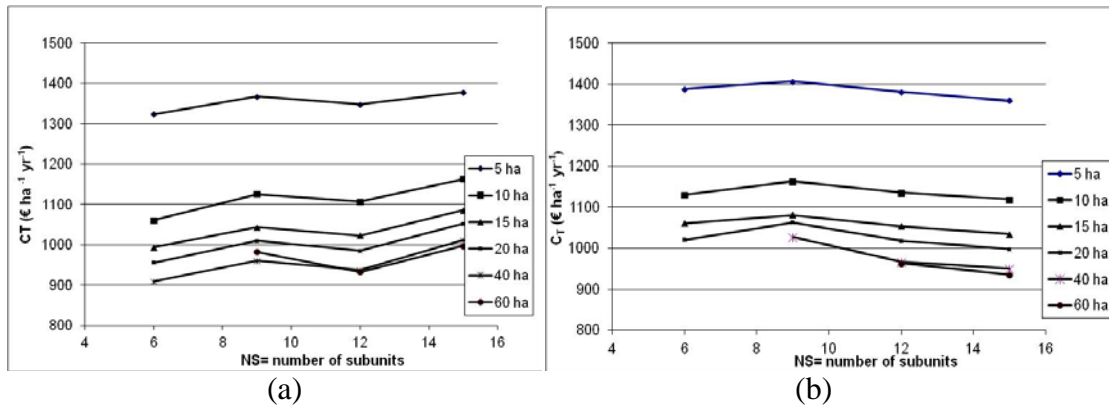


Fig. 7 Evolución de C_T según el NS para un sistema de riego por aspersión (a) en marco 15x15 con $ARa= 8 \text{ mm h}^{-1}$ y (b) 18x18 con $ARa= 6.33 \text{ mm h}^{-1}$, en parcelas de distinto tamaño, para un SWT= 60m en la UH 04-04 (acuífero libre).

En consecuencia, para las instalaciones de riego por aspersión se recomienda el mayor número de subunidades posible que permita contratar solo el consumo de energía en periodos P2 y P3, pero dejando margen en el número de horas de riego disponibles para poder recuperar las horas perdidas en caso de avería sin tener que consumir energía en high period (P1), con coste de la energía muy elevado.

3.2 Efecto del área regada (S) sobre el coste total (C_T)

Como era de esperar el C_T disminuye al aumentar la superficie de la parcela regada (Fig. 8), y aumenta al hacerlo el SWT para los distintos marcos de riego y ARa considerados. El C_T es muy grande para parcelas menores de 15 ha debido a la gran repercusión sobre el mismo del coste del sondeo y de la línea eléctrica hasta la parcela.

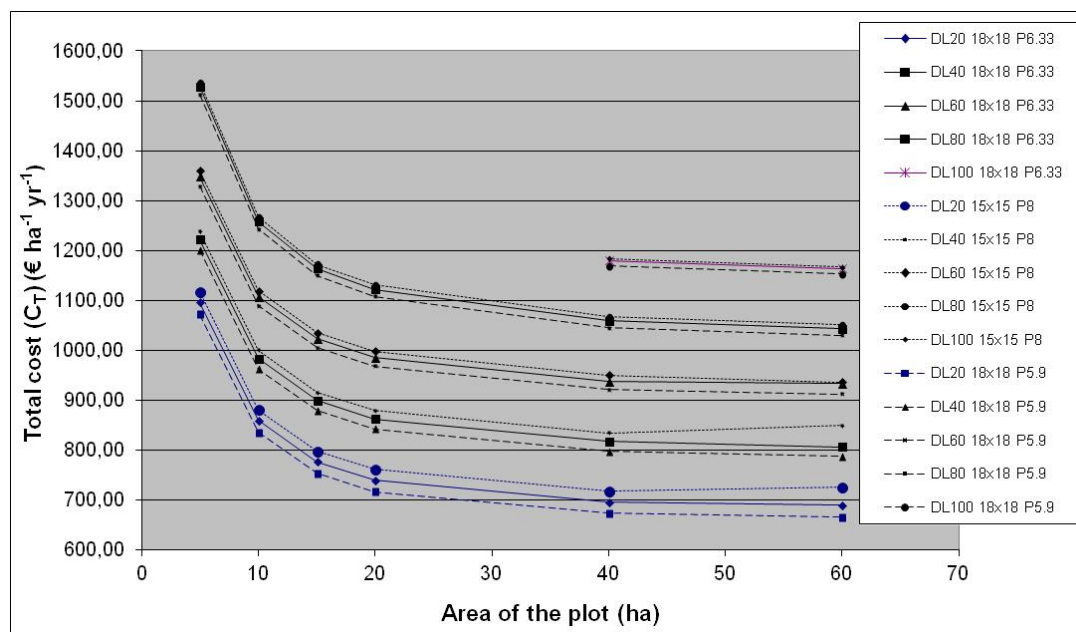


Fig. 8. Evolución del C_T con el área de la parcela para los distintos marcos de riego y SWT estudiados en el acuífero libre, utilizando 12 subunidades de riego en marco 18x18 y 15 en marco 15x15.

Los resultados indican que el marco 18x18 con $AR_a = 5.9 \text{ mm h}^{-1}$ presenta el menor C_T , aunque las diferencias son muy pequeñas, y se acortan al aumentar el SWT. Esto matiza los resultados obtenidos analizando solo las subunidades de riego al suponer un valor medio de C_w y C_e , sin tener en cuenta los periodos tarifarios, donde la solución de menor C_T era con el marco 15 x 15 con $AR_a = 8.0 \text{ mm h}^{-1}$ (Carrión et al. 2013). Los valores correspondientes a $DL = 100 \text{ m}$ no se han calculado para $S < 40 \text{ ha}$ por la limitaciones en la profundidad del sondeo consideradas en la Table 1.

3.3 Análisis de los componentes del coste total (C_T) y su variación con NS y DL

Analysis of the components of the C_T and its variation with NS and DL

En la Figure 9 se muestra la evolución de la componente energética (C_e) y de inversión más mantenimiento ($C_a + C_m$) en el C_T para distinto NS, en una parcela de 20 ha para los dos marcos de riego estudiados y $SWT = 60$ and 80 m .

En todos los casos, la energía (C_e) tiene mayor influencia en el C_T , representando alrededor del 70% del C_T en los dos marcos de riego. Cabe también destacar que la inversión ($C_a + C_m$) tiende a disminuir al aumentar el número de sectores, ya que la bomba, el transformador y las tuberías necesarias son de menor tamaño, mientras que C_e varía con NS ya que estos condicionan la utilización del número de horas disponibles según los periodos tarifarios contratados como se ha dicho antes.

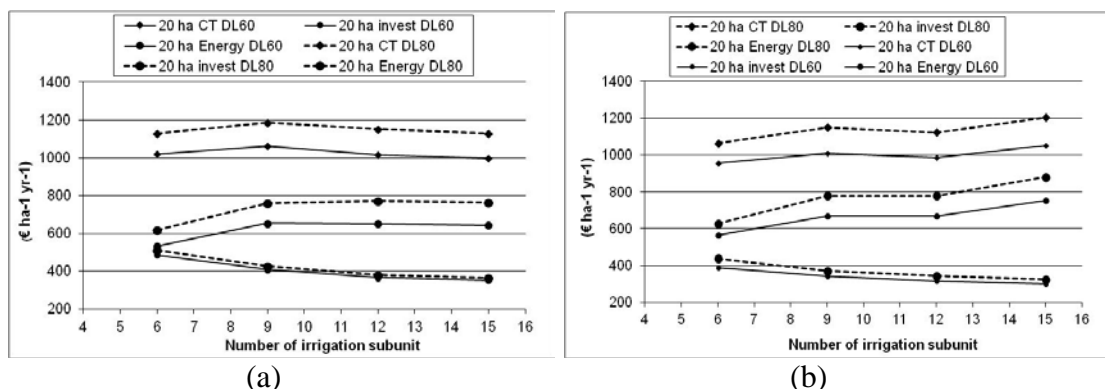


Fig. 9. Evolución de los componentes de energía (C_e) e inversión más mantenimiento (C_a+C_m) en el C_T en para una parcela de 20 ha, (a) en marco 15x15 con $ARA= 8 \text{ mm h}^{-1}$ y (b) en marco 18x18 con $ARA= 6.33 \text{ mm h}^{-1}$, para $SWT= 60$ and 80 m .

Como era de esperar, al aumentar el SWT aumentan los costes energéticos (C_e), y en mucha menor medida los de inversión (principalmente por el aumento de la potencia de la bomba necesaria), lo que se traduce en un mayor C_T .

3.4. Determinación del coste agua de riego.

Un dato importante a conocer es el coste de transportar el agua desde la fuente hasta la entrada de una subunidad de riego (C_{ws}), incluyendo los costes de inversión y de operación en este proceso, dejando el agua a presión atmosférica a la salida. Como ejemplo se representa en la Figura 10 el C_{ws} para una parcela de 20 ha con 12 sectores (1.66 ha por sector) en marco 18x18 m y 15 sectores (1.33 ha por subunidad) en marco 15x15 m, en función del SWT en la UH 04-04 (acuífero libre), referido tanto a la unidad de volumen como a la unidad de superficie regada, en este caso para un cultivo de maíz. Los resultados indican que el C_{ws} aumenta significativamente al hacerlo el SWT (Fig. 10 a y b) y disminuye al aumentar la superficie de la parcela (Fig. 10 c y d), con pequeñas diferencias entre los marcos de riego. Estas diferencias son algo más marcada para el coste por unidad de volumen, relacionado directamente con la ARA . Así el marco 18 x18 con $ARA=5.9 \text{ mm h}^{-1}$ presenta el menor C_T debido a que el caudal transportado es menor que en marco 15x15 con $ARA= 8.0 \text{ mm h}^{-1}$. Estas pequeñas diferencias del C_{ws} se reducen al calcular el coste por unidad de superficie, como consecuencia del mayor consumo de agua cuando se utilizan los marcos de riego grandes ($8,249 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ en marco 18x18, frente a $7,766 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ en marco 15x15) (Table 4)

La comparación de las Figs. 8 y 10c pone de manifiesto el mayor coste de inversión y de energía necesario para la subunidad de riego con marco 15x15 trabajando a 350 kPa que con marco 18x18 trabajando a 300 kPa. Este incremento de coste no se ve compensado con el mayor consumo de agua durante la campaña de riego en el marco 18x18 debido a su menor eficiencia de riego.

La gran dependencia del coste del agua (C_{ws}) del tamaño de la parcela a regar y del SWT pone de manifiesto el cuidado con que deben realizarse los estudios que consideran un coste del agua único para analizar distintos escenarios de relaciones entre los parámetros que intervienen en el proceso de aplicación del agua de riego.

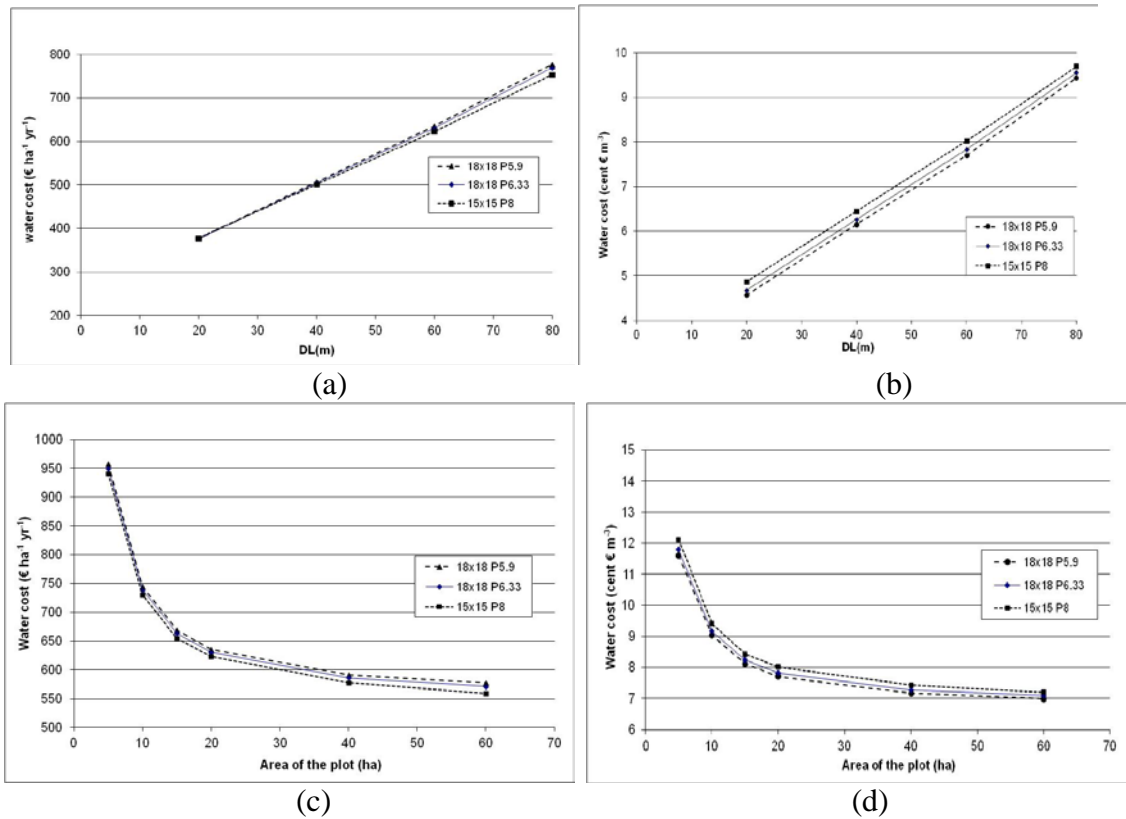


Fig. 10 Coste de transportar el agua desde la fuente hasta la entrada de una subunidad de riego, para un cultivo de maíz en la UH04-04 (acuífero libre), con diferentes marcos de riego y ARA, calculado en función del DL (a y b) y de la superficie regada (c y d), expresados tanto por unidad de superficie (a y c) como por unidad de volumen (b y d).

En la Figura 11 se muestra la descomposición del C_T en sus componentes: coste del agua (C_{ws}), coste de inversión más mantenimiento en la subunidad ($C_{as} + C_{ms}$), y coste de energía (C_{es}) para dar la presión (H_{su}) necesaria al agua a la entrada de la subunidad, para distintos SWT, en una parcela de 20 ha con 12 sectores (1.66 ha por sector) en marco 18x18 y 15 sectores (1.33 ha por subunidad) en marco 15x15.

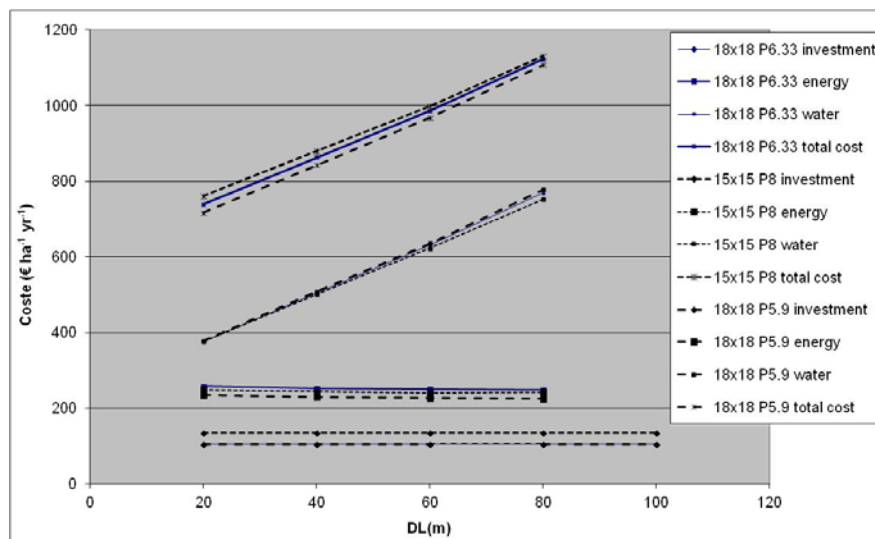


Fig. 11 Descomposición del C_T en sus componentes (C_{ws} , $C_{as}+C_{ms}$, C_{es}), para distintos SWT en la UH 04-04 (acuífero libre), en una parcela de 20 ha, con 12 NS (1.66 ha por sector) en marco 18x18 y 15 sectores (1.33 ha por subunidad) en marco 15x15.

Los resultados ponen de manifiesto el gran peso de C_{ws} en C_T y su gran dependencia del SWT, siendo prácticamente despreciables las diferencias entre marcos de riego, presiones de trabajo y ARA, aunque la solución de menor C_T es para el marco 18x18 con $ARA= 5.9 \text{ mm h}^{-1}$.

Por último cabe indicar que las diferencias en el C_T entre el marco 18x18 con $ARA= 5.9 \text{ mm h}^{-1}$ y el marco 15x15 con $ARA= 8 \text{ mm h}^{-1}$ se acortan cuando el incremento anual del precio de la energía (P_e) ($e=0.1$) fuera el doble que el de la inversión C_i ($i=0.05$), llegando a ser casi iguales los C_T cuando el incremento en P_e ($e=0.15$) fuera tres veces superior al de C_i ($i=0.05$).

3.5. Comparativa entre acuífero libre y confinado.

En primer lugar es preciso indicar que el C_T mínimo está muy influenciado por el tamaño del sondeo, dados los incrementos discretos de diámetro (cada 50 mm) que existen en el mercado (Table 3). Esta circunstancia hace que sea preferible en algunos casos utilizar tubería de impulsión de menor diámetro para que no sea necesario incrementar el diámetro del sondeo, aunque aumenten los costes de energía.

En la Figure 12 se muestra, para marco 18x18 con $ARA=6.33 \text{ mm h}^{-1}$ y $ND= 60 \text{ m}$, la comparación de costes entre acuífero libre y confinado: (a) C_i inversión; (b) C_e energía; (c) C_T total

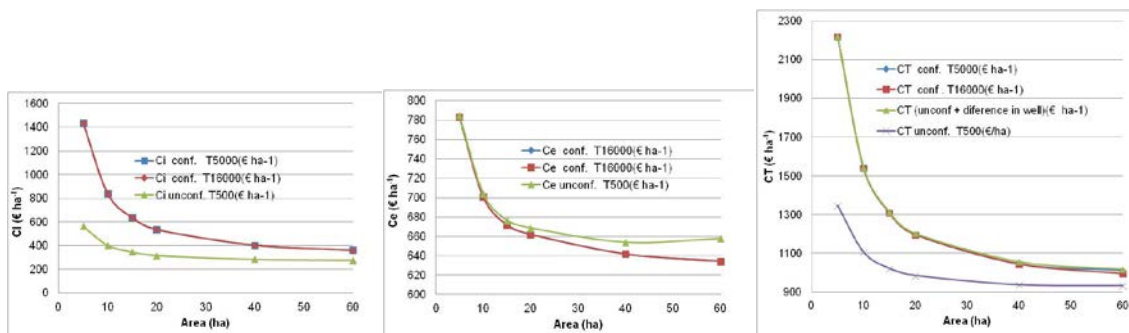


Fig. 12. Comparación entre acuífero libre y confinado para marco 18x18 con $ARA=6.33 \text{ mm h}^{-1}$ y $ND= 60 \text{ m}$ en cuanto a los costes de: (a) C_i inversión; (b) C_e energía de bombeo; (c) C_T total

Las diferencias de inversión son significativas entre ambos tipos de acuíferos (entre un 30 y un 60%), y disminuyen al aumentar la superficie de la parcela al necesitar mayor caudal y por tanto mayor profundidad del sondeo (Table 1), siendo el incremento de profundidad proporcionalmente mayor en el caso de acuífero libre que en el confinado. Las diferencias en los costes de energía son mucho menores (entre un 0.2 y un 2.5%), aunque estas aumentan con la superficie de la parcela, debido fundamentalmente al incremento de potencia necesaria, por el mayor valor de

drawdown in the well (dd) al tener menor transmisividad (T). Las diferencias en el C_T las establece fundentemente los costes de inversión del sondeo, al ser mucho más caros en los acuíferos confinados que en los libres considerados en este estudio.

El incremento de la transmisividad T en acuíferos confinados, pasando de 5,000 a 16,000 $\text{m}^{-2} \text{day}^{-1}$, supone solo una disminución de potencia del orden de 0.2 kW, una disminución del dd= 0.2 m y una caída de $C_T < 1.8 \text{€ ha}^{-1}$, es decir, son diferencias despreciables.

En la Figure 13, para marco 18x18 con $\text{ARa}=6.33 \text{ mm h}^{-1}$ y $\text{ND}= 60 \text{ m}$, se muestra la evolución de la profundidad de la bomba y la potencia necesaria en la misma con la superficie de la parcela, para el acuífero libre (con $T= 500 \text{ m}^{-2} \text{day}^{-1}$ y $R= 800 \text{ m}$), y para el confinado (con $T= 5,000$ y $T=16,000 \text{ m}^{-2} \text{day}^{-1}$, para $R= 1500 \text{ m}$).

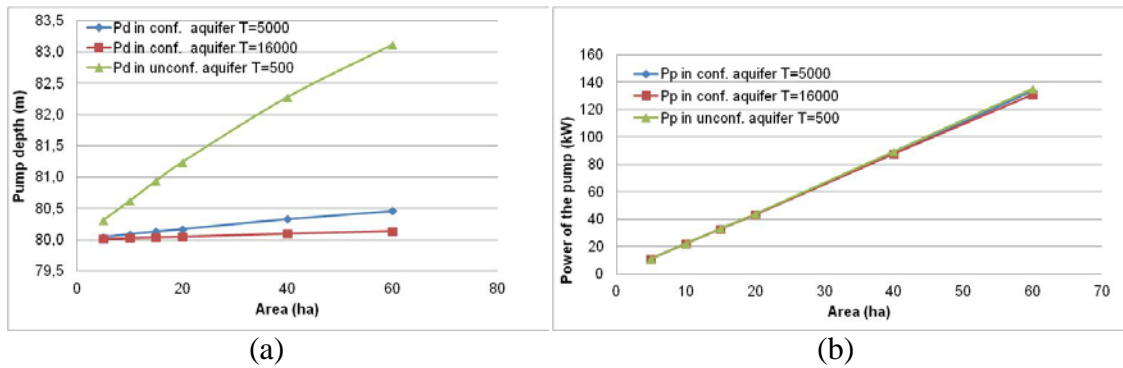


Fig. 13. Para marco 18x18 con $\text{ARa}=6.33 \text{ mm h}^{-1}$ y $\text{ND}= 60 \text{ m}$, evolución de: (a) la profundidad de la bomba y (b) su potencia, con la superficie de la parcela, tanto para el acuífero libre (con $T= 500 \text{ m}^{-2} \text{day}^{-1}$ y $R= 800 \text{ m}$), como para el confinado (con $T= 5,000$ y $T=16,000 \text{ m}^{-2} \text{day}^{-1}$, con $R= 1500 \text{ m}$),

Los resultados indican un mayor incremento de la profundidad de la bomba en el acuífero libre que en el confinado (Fig. 13a), lo cual es debido a las diferencias de los valores de T, aunque estas diferencias no llegan a superar los 3 m en los casos estudiados. The drawdown in the well (dd) es de 1,3 m para $S= 20 \text{ ha}$ en el acuífero libre y 0.2 m para el acuífero confinado, a lo que hay que sumar el descenso estacional (S_d) como consecuencia de los bombeos continuados a lo largo de la campaña de riegos, que como se ha dicho en la Table 1 llega a ser de 5m al final de campaña. Por eso (Table 1), para el caso representado en la Figure 13, la profundidad de la bomba es $60 (\text{SWT}) + 5 (S_d) + 15 + 1.3 (\text{dd}) = 81.3 \text{ m}$

El aumento de la potencia necesaria en la bomba con la superficie de la parcela es en cambio semejante en el acuífero libre y en el confinado (Fig. 13b) ya que las diferencias de los valores de DL, consecuencia de los mayores valores de dd en el acuífero libre, que son menores de 3 m, no tienen repercusión en la potencia de la bomba.

4 Conclusions

El coste del agua (C_{ws}) para la extracción y transporte desde la fuente al punto de utilización, crece con el nivel dinámico del acuífero (DL) y disminuye con el tamaño de la parcela a regar (S). Teniendo en cuenta este comportamiento, hay que tener cuidado con los estudios que consideran un C_{ws} único para analizar distintos escenarios de relaciones entre los parámetros que intervienen en el proceso de aplicación del agua de riego.

Para los casos estudiados, el C_{ws} es principalmente condicionado por el coste de inversión del sondeo, siendo el confinado un 30-60% más caro que el libre.

El coste de la energía es en cambio más caro en el acuífero libre (aunque solo un 0.2 - 2.5%) debido al menor valor de transmisividad (500 frente a 5000 ó 16000 $m^2 day^{-1}$), lo que produce diferencias pequeñas en the drawdown in the well (dd) (entre 0.2 y 3 m).

The annual water application cost per unit of irrigated area (C_T) decreases when plot size increases and increase with dynamic water level, having lower influence on C_T the remainder factor as number of subunit, the sprinkler spacing or the average application rate for the studied cases. For plots smaller than 15 ha, the C_T have a large increases due to the high contribution of the well and electrical line costs on necessary investment cost.

The energy is the main component of C_T , representing 70 % in the studied cases. This indicates the necessity for developing algorithms and tools to optimize the performance of water pumping facilities in irrigation systems.

The number of subunit in the plot for minimum C_T is that utiliza al máximo las horas disponible según los periodo tarifarios contratados, pero dejando un cierto margen en el número de horas disponibles para poder recuperar las horas perdidas en caso de avería.

A useful tool named PRESUD has been developed to determine the optimal pump size as well as pumping pipe and distribution pipe diameters, together with the optimal irrigation subunit sizing under specific conditions of an irrigated plot. It is a valuable Decision Support System tool for irrigation advisory services in helping farmers and technicians in the design and sizing of their sprinkler irrigation systems.

Acknowledgements

The authors wish to express their gratitude to the Spanish Ministry of Education and Science (MEC), for funding the PET2008_0175_02, and AGL2011-30328-C02-01 projects (Co-funded by FEDER).

Notation

The following symbols are used in this paper:

A = investment annuity ($€T^{-1}$)

AR_a = average application rate of the irrigation system ($L T^{-1}$)

c = coefficient of the characteristic curve

C = friction coefficient

C_a = investment annuity per unit of irrigated area ($€L^{-2}T^{-1}$)

C_{as} = investment annuity per unit of irrigated área, only in subunit ($€L^{-2}T^{-1}$)

C_e = energy annuity per unit of irrigated area ($€L^{-2}T^{-1}$)

C_{es} = energy annuity per unit of irrigated area, only to give the necessary pressure in subunit inlet (H_{su}) ($€L^{-2}T^{-1}$)

C_i = total investment cost (€)

C_m = maintenance cost ($€L^{-2}T^{-1}$)

C_{ms} = maintenance cost, only in subunit ($€L^{-2}T^{-1}$)

C_{op} = annual operation cost ($€T^{-1}$)

CRF = capital recovery factor

C_T = total annual cost of water application (€)

C_{ws} = cost for transporting water from the source to the irrigation subunit inlet (€)

dd = theoretical drawdown in the well (L)

D = inner diameter of pipe (L)

D_d = drilling diameter (L)

D_l = diameter of lateral pipe (L)

DL = dynamic lift (L)

D_p = inner diameter of pumping pipe (L)

D_{wp} = inner diameter of well pipe (L)

e = annual rate of escalation in energy costs (decimal)

E_a = general application efficiency for the irrigation system (dimensional)

E_p = efficiency of pumping system (dimensional)

EU = emission uniformity (dimensional)

h = the saturated depth of drilled aquifer after pumping (m)

h_a = average pressure head in the subunit (L)

h_f = pipe head loss with constant flow rate (L)

h_s = minor singular head losses (L)

H = pressure head required at the pump

H_0 = pressure head required at the inlet of the irrigation subunit (L)

H_s = saturated depth of aquifer before pumping (L)

H_{su} = pressure head required at inlet of the valve located in the origin of subunit (L)

i = interest rate (decimal)

K = permeability of the aquifer ($L T^{-1}$)

L = pipe length (L)

N = useful life (T)

N_p = power absorbed for irrigation water application (kW)

NS = number of subunits

O_t = monthly operation time of the pump (T)

P_a = power access price ($€kW^{-1} T^{-1}$),

P = energy rate ($€kW^{-1} T^{-1}$)

P_p = power of the pump (kW)

P_d = pump depth (L)

P_t = power of the transformer (kVA)

q = specific capacity ($L^3 T^{-1} L^{-1}$)

q_a = average sprinkler flow in the subunit ($L^3 T^{-1}$)
 Q = system flow from the aquifer ($L^3 T^{-1}$)
 Q_o = inflow rate to the pipe ($L^3.T$)
 Q_{os} = inflow rate to the irrigation subunit ($L^3.T$)
 R = radius of the cone of influence (L)
 RC = Reverse Circulation
 Re = Reynolds number
 R_n = net crop irrigation water requirement ($L^3 L^{-2} T^{-1}$)
 R_g = gross crop irrigation water requirement ($L^3 L^{-2} T^{-1}$)
 S = irrigated area (L^{-2})
 S_d = seasonal drawdown (L)
 s_s = sprinkler spacing (L)
 s_l = lateral pipe spacing (L)
 SWT = static water table (L)
 O_t = monthly operation time of the pump, (T);
 T = transmissivity of the aquifer ($L^2 T^{-1}$)
 W_d = well depth (L)
 WPD = impermeable depth in the top of confined aquifers (m)

Greek symbols

ν = water kinematic viscosity ($L^2.T^{-1}$)
 Δh = difference in extreme pressure heads in the irrigation subunit (% of h_a)
 Δq = difference in extreme sprinkler flow in the irrigation subunit (% of q_a)

References

- Carrión F, Montero J, Planells P, Tarjuelo JM, Moreno MA (2013) Design of sprinkler irrigation subunit of minimum cost with proper operation. Application at corn crop in Spain. Water Resources Management. (in press)
- Csallany, S. (1965): The Hydraulic Properties and yields of dolomite and limestone aquifers. Symposium on fractured rocks, Dubronik. Intern. Assoc. Scient. Hydrol. Pub. N° 73, pp 120-138.
- Custodio, E y Llamas, M.R. (1983): Hidrología subterránea. Ed. Omega. Barcelona, España. 2350 p.
- Keller J, Bliesner R D (1990) Trickle irrigation. "Sprinkler and trickle irrigation", Van Nostrand Reinhold, New York, 427–582.

- Kumar, D., Heatwole, C. D., Ross, B. B., and Taylor, B. _1992_. “Cost models for preliminary economic evaluation of sprinkler irrigation systems.” *J. Irrig. Drain. Eng.*, 118_5_, 757–775.
- Lamaddalena, N., Fratino, U. and Daccache, A. 2007. On-farm sprinkler irrigation performance as affected by the distribution system. *Biosystems Engineering*, 96 (1): 99-109.
- Martín de Santa Olalla FJ, Calera A, Domínguez A (2003) Monitoring irrigation water use by combining Irrigation Advisory Service, and remotely sensed data with a geographic information system. *Agric. Water Manage.* 61 (2): 111-124.
- Molden D. 2007. Water for food.Water for life. A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture. International Water Management Institute (IWMI) and FAO.Montalvo T (2007) Riego localizado. Diseño de instalaciones. Ediciones VJ, Valencia, Spain. (in Spanihs)
- Moreno, M. A., Planells, P., Córcoles, J. I., Tarjuelo, J. M. and Carrión, P. A. 2009. Development of a new methodology to obtain the characteristic pump curves that minimize the total cost at pumping stations. *Biosyst. Eng.* 102:95-105.
- Moreno MA, Corcoles JI, Moraleda DA, Martinez A, Tarjuelo JM (2010) Optimization of underground water pumping. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 136, 414-420.
- Nelder, J A, and Mead, R. (1965). “A Simplex Method For Function Minimization”, *Computation Journal*, 7(4), 308-313.
- Ortega, J.F.; de Juan, J.A.; Tarjuelo, J.M. 2005. Improving water management: the Irrigation Advisory Service of Castilla-La Mancha (Spain). *Agricultural Water Management* 77, 37-58.
- Ortiz J. N., Montero J., Martinez R., Tarjuelo J. M. 2006. Set sprinkler irrigation and its cost. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 132(5).
- Parker, D., Cohen-Vogel., D.R., Vanderbilt, D.R., Osgood, D.E., Zilberman, D., 2000. Publicly funded weather database benefits users statewide. *California Agriculture* 54(3):21-25.
- Ramírez et al., 1988
- Rodríguez Díaz, J.A., Weatherhead, E. K., Knox , J. W., Camacho, E., 2007. Climate change impacts on irrigation water requirements in the Guadalquivir river basin in Spain. *Regional Environmental Change*, 7, 149-159.
- Sanz, D., Gómez-Alday, J.M., Castaño, S., Moratalla, A., De las Heras, J., Martínez-Alfaro, P.E. (2009): Hidrostarigrafic framework and hydrogeological behaviour of the Mancha Oriental System (SE Spain). *Hydrogeology Journal* 17, pp 1375-1391.
- Scherer T, Weigel J (1993) In Planning to Irrigate. A Checklistin. NDSU Extension Service. North Dakota State University. <<http://www.ext.nodak.edu/extpubs/ageng/-irrigate/ae91w.htm>> (March 21, 2003)
- Singh, H., Mishra, D., Nahar, N.M., 2002. Energy use pattern in production agriculture of a typical village in arid zone, India. Part I. *Energy Conversion and Management* 43, 2275–2286.
- Tarjuelo J.M. 2005. El riego por aspersión y su tecnología. 3ª Edición Mundi-Prensa, S.A. Madrid. (In Spanish)

Tarjuelo JM, de Juan JA, Moreno MA, Ortega JF (2010) Water resources deficit and water engineering. Spanish Journal of Agricultural Research. 8 (S2): 102-121