

UNIVERSIDAD DE CASTILLA LA-MANCHA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS AGRÓNOMOS Y DE MONTES
DEPARTAMENTO DE PRODUCCIÓN VEGETAL Y TECNOLOGIA AGRARIA
CENTRO REGIONAL DE ESTUDIOS DEL AGUA
DOCTORADO EN CIENCIA E INGENIERÍA AGRARIAS
CAMPUS ALBACETE



TESIS DOCTORAL
USO EFICIENTE DEL AGUA Y LA ENERGÍA: MODELOS DE DISEÑO Y
GESTIÓN CONJUNTA DE SISTEMAS DE BOMBEO Y BALSAS EN REDES
COLECTIVAS Y SISTEMAS DE RIEGO.

Doctorando:

Argenis Rafael Izquier Mosqueda

Directores:

Dr. Miguel Ángel Moreno

Dr. Jose María Tarjuelo

Albacete, Junio de 2015

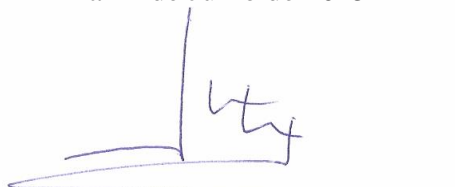


ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
AGRÓNOMOS Y DE MONTES
CENTRO REGIONAL DE ESTUDIOS DEL AGUA

DEPARTAMENTO DE PRODUCCIÓN VEGETAL Y TECNOLOGÍA AGRARIA

Don José María Tarjuelo, Catedrático de Universidad en el Departamento de
Producción Vegetal y Tecnología Agraria de la
E. T. S. I. Agrónomos y de Montes de Albacete (UCLM), como tutor del Trabajo de
Doctorado titulado “**USO EFICIENTE DEL AGUA Y LA ENERGÍA:
MODELOS DE DISEÑO Y GESTIÓN CONJUNTA DE SISTEMAS DE
BOMBEO Y BALSAS EN REDES COLECTIVAS Y SISTEMAS DE RIEGO**”
realizado por el Doctorando en Ciencia e Ingenierías Agrarias (2013-2014) en la
Universidad de Castilla-La Mancha, Don. Argenis Rafael Izquier Mosqueda, da el
visto bueno para su presentación.

Y para que así conste a los efectos oportunos, lo firma en Albacete,
a 12 de Junio de 2015



Fdo. José María Tarjuelo



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
AGRÓNOMOS Y DE MONTES
CENTRO REGIONAL DE ESTUDIOS DEL AGUA

DEPARTAMENTO DE PRODUCCIÓN VEGETAL Y TECNOLOGÍA AGRARIA

Don Miguel Ángel Moreno, Profesor Contratado Doctor en el Departamento de
Producción Vegetal y Tecnología Agraria de la
E. T. S. I. Agrónomos y de Montes de Albacete (UCLM), como co-tutor del Trabajo
de Doctorado titulado **“USO EFICIENTE DEL AGUA Y LA ENERGÍA:
MODELOS DE DISEÑO Y GESTIÓN CONJUNTA DE SISTEMAS DE
BOMBEO Y BALSAS EN REDES COLECTIVAS Y SISTEMAS DE RIEGO”**
realizado por el Doctorando en Ciencia e Ingenierías Agrarias (2012-2015) en la
Universidad de Castilla-La Mancha, Don. Argenis Rafael Izquier Mosqueda, da el
visto bueno para su presentación.

Y para que así conste a los efectos oportunos, lo firma en Albacete,
a 12 de Junio de 2015

Fdo. Miguel Ángel Moreno

AGRADECIMIENTO

Este trabajo de investigación ha sido posible gracias a la beca sueldo exterior otorgada por el Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad Central de Venezuela (CDCH-UCV), con lo cual me ha permitido realizar parte del financiamiento necesario. A los cuales les doy mis mas sinceros agradecimientos.

A la Universidad Central de Venezuela por el apoyo recibido en la consecución de esta investigación al ser miembro de su cuerpo docente en la Facultad de Agronomía.

Al Centro Regional de Estudios del Agua (CREA) adscrito a la Universidad de Castilla La Mancha (UCLM) por la gran acogida y apoyo en materiales y equipos relacionado con la investigación.

Un especial agradecimiento a mis Tutores Dr. Miguel Ángel Moreno y Dr. Jose María Tarjuelo por su gran apoyo ante los retos que se presentaron en cada etapa de la investigación; y mas que su apoyo académico su calidad humana invaluable fueron pilar fundamental para el logro de esta meta.

DEDICATORIA

“ ... a todas aquellas personas que de una u otra manera siguen siendo mi inspiración.”

RESUMEN

Los sistemas de riego presurizados a pesar de requerir más energía son los de mayor demanda al presentar mayor flexibilidad en la gestión del riego y la adaptación a un amplio rango de cultivos, pudiendo ser a su vez más eficientes en el uso del agua. El objetivo fue desarrollar modelos con un enfoque holístico de diseño y gestión conjunta de sistemas de bombeo y balsas en sistemas de riego alimentados desde sondeo buscando minimizar los costes totales anuales de aplicación de agua por unidad de área (C_T) incluyendo la inversión (C_a) operación (C_e) y mantenimiento (C_m). Los modelos DOPW (design of centre pivot supplied from wells), DEPIRE (design of centre pivot with regulating reservoir) y DROND (design of reservoir on demand network) fueron desarrollados e implementados en MATLAB 2012b (The MathWorks Inc., Natick, MA); se determinaron los caudales, diámetros, potencia y volumen de balsa óptimo, teniendo en cuenta la demanda de agua del sistema, disponibilidad de agua en la fuente, C_a y C_e .

La incorporación de balsas de regulación y almacenamiento en sistemas pivots generan los menores C_T en superficies >100 ha, al compararlo con la alimentación directa desde sondeo. El C_T se incrementa linealmente con el nivel dinámico en el sondeo (ND) para 100 ha y usando el modelo DEPIRE pasa a ser de 659 a 2 414 € ha⁻¹ año⁻¹ y usando el modelo DOPW va de 618 a 2 582 € ha⁻¹ año⁻¹ cuando el ND va de 0 a 200 m, debido al significativo incremento del C_e en la extracción de agua desde el acuífero. El C_e es el principal componente del C_T , representando entre el 24,8% y el 80,0% en los casos estudiados. La forma de operación y manejo de la red de riego condiciona las dimensiones de la balsa y los C_T a la red para una garantía de suministro de agua, en caso de ND al pasar de 150 a 200 m el volumen de balsa pasa de 2 862 a 1 725 m³ con costes de 374,0 y 431,2 € ha⁻¹ año⁻¹ respectivamente causado por la disminución de potencia y de caudal en la extracción a costa del mayor consumo energético cuando se aplica el modelo DRODN. Las herramientas DOPW,

DEPIRE y DRODN, permiten detectar las interrelaciones entre los C_a y C_e , y las variables que lo componen.

Palabras claves: modelos, balsas de regulación, diseño óptimo de pivots, diseño óptimo de sondeos, costes de riego anuales.

ABSTRACT

Pressurized irrigation is the most demanded irrigation system. Despite of its high energy requirement, these systems are water use efficient with a great flexibility for irrigation management and adaptability to a wide range of crops. The purpose of the project was to develop models to design and manage global pumping systems and reservoirs in irrigation systems feed from wells with a holistic approach. The model aims to minimize annual water application costs per unit area (C_T) including investment (C_a), operation (C_e) and maintenance (C_m) costs. Three models were developed and implemented: Design Of centre Pivot supplied from Wells (DOPW), DEsign of centre PIvot with Regulating rEservoir (DEPIRE) and Design of Reservoir ON Demand irrigation network (DROND). It was determined optimal flows, pipe diameters, pumps power and the volume of the regulation reservoir, considering water requirement system, availability in the tube well, C_a and C_e . Lower C_T were observed when using an intermediate reservoir centre pivot systems on irrigated areas > 100 ha, in comparison with centre pivot systems feed directly from the borehole. C_T increases linearly with the dynamic water level in borehole (ND) for $S = 100$ ha. Using the DEPIRE model we found values for C_T from 659 to 2 414 € ha⁻¹ year⁻¹, and with the DOPW model values goes from 618 to 2 582 € ha⁻¹ año⁻¹ when ND varies from 0 to 200 m, due to the significant increase of C_e in the water extraction from borehole. C_e is the main component of C_T , representing between 24.8% and 80.0% in the cases studied. Operation and management of irrigation network conditioned the size of the reservoir and the C_T to the irrigation network to guarantee water supply. When ND ranges from 150 to 200 m, the reservoir volume varies from 2 862 to 1725 m³, with associated costs from 374.0 and 431.2 € ha⁻¹ year⁻¹ respectively, caused by decreasing pumping power and flow in the extraction at expenses of greater power consumption when the model DROND is applied. The

tools DOPW, DRODN and DEPIRE is able to detect interrelations between C_a and C_e , and their components.

Keywords: models, reservoir of regulation, optimal design of centre pivot system, optimal design of borehole, annual irrigation costs.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
AGRADECIMIENTO	iv
DEDICATORIA	v
RESUMEN.....	vi
ABSTRACT	viii
TABLA DE CONTENIDO.....	x
LISTA DE TABLAS	xiv
LISTA DE FIGURAS	xv
1. INTRODUCCIÓN	18
1.1. Consideraciones generales	18
1.2 La demanda de agua y energía en el regadío.	20
1.3. Diseño dimensionado y gestión de sistemas de bombeo en el regadío.....	24
1.4. Las balsas de almacenamiento y regulación.	26
1.5. Diseño, dimensionado y manejo de sistemas de riego presurizados en parcelas.	31
2. Justificación y objetivos.....	32
2.1. Objetivo general	32
2.2. Objetivos específicos	33
3. MATERIALES Y METODOS	34
3.1. Herramientas desarrolladas.	34
3.2. Zona de estudio.	40
3.3. Casos de estudio.....	41

3.3.1. Casos de estudio para aplicación de los modelos DOPW y DEPIRE.....	41
3.3.2. Casos de estudio para aplicación del modelo DRODN.	42
3.4. Consideraciones comunes de los modelos.	43
3.4.1. Hidráulica del agua subterránea.	43
3.4.2. Dimensiones optimas de la balsa.	44
3.4.3. Determinación de las necesidades netas mensuales de agua de los cultivos.	46
3.4.4. Volumen y balance de agua en la balsa.	49
3.4.5. Optimización de curvas características de bomba.	51
3.4.6. Cálculos de potencia de bomba y pérdidas de carga.	54
3.4.7. Cálculos económicos.....	56
3.4.7.1. Anualidad de la inversión.....	56
3.4.7.2. Costes del sondeo.	57
3.4.7.3. Coste de la balsa.....	59
3.4.7.4. Coste del equipo pívot.....	59
3.4.7.5. Costes de operación.	59
3.4.8. Funcionamiento del equipo pívot.....	61
3.4.9. Datos topográficos y de las instalaciones.....	65
3.4.10. Otros datos	66
3.5. Consideraciones específicas de los modelos.....	67
3.5.1. Función objetivo a optimizar en los modelos.	67
3.5.2. Diagrama de flujo del modelo DOPW.....	68
3.5.2.1. Método para estimar la evolución de la demanda de agua en el sistema pívot.	70
3.5.3. Diagrama de flujo del modelo DEPIRE.....	70
3.5.3.1. Algoritmo para determinar las dimensiones de la balsa.....	72
3.5.4. Diagrama de flujo del modelo DRODN.	73
3.5.4.1. Métodos para estimar la evolución de la demanda de agua en las redes colectivas de riego.....	76

3.5.4.2. Algoritmo para determinar volumen de regulación (V_r) de la balsa. .	82
3.5.5. Costes de extracción del agua (C_w) y de aplicación del agua de riego (C_A) con equipos pivot (modelos DOPW y DEPIRE).	87
3.5.6. Costes de extracción del agua (C_w) y de alimentación a la red de riego colectiva de riego a la demanda (C_R) (modelo DRODN).	88
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	89
4.1. Coste total de aplicación del agua de riego con pivot alimentado directamente desde sondeo (C_T).	90
4.2. Coste total de aplicación del agua con un pivot alimentado desde una balsa intermedia de regulación (C_T).	92
4.3. Comparación del coste total (C_T) de aplicación del agua de riego con sistema pivot alimentados directamente desde sondeo y con una balsa de regulación intermedia.....	94
4.4. Componentes del coste de extracción del agua (c_w) y del coste de aplicación del agua de riego (c_a) con equipos pivot.	98
4.5. Dotación óptima y operación del pivot.	99
4.6. Volumen óptimo de balsa en redes colectivas de riego a la demanda (modelo DRODN).	100
4.7. Coste total de suministro de agua a una en red de riego a la demanda.	102
4.8. Relación entre el caudal y el consumo de potencia y de energía en los distintos periodos tarifarios.....	105
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	109
6. BIBLIOGRAFÍA.	111
7. ANEJOS.....	120
7.1. Glosario de términos y símbolos.....	120

7.2. Artículo científico titulado “Optimal reservoir capacity for centre pivot irrigation water supply: Maize cultivation in Spain”, publicado en revista Biosystems Engineering..... 126

LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 3.1. Superficie a evaluar con el equipo pívot y su correspondiente radio.....	42
Tabla 3.2. Necesidades de agua mensuales en Castilla la Mancha para cultivo de maíz ($N_{n(m)}$) de ciclo largo sembrado en Albacete y la alternativa de cultivo ($N_{n(R)}$) (con 81% de viñedo y 19% de olivar) en la red colectiva de riego a la demanda de “La Grajuela”.	48
Tabla 3.3. Ecuaciones de costes de bombas, tuberías y accesorios obtenidos a partir de costes de mercados de empresas distribuidoras.	58
Tabla 3.4. Número de horas disponibles en cada periodo de coste energético para cada mes del año.	61
Tabla 3.5. Costes por acceso a la potencia y por consumo de energía eléctrica.	61
Tabla 3.6. Valores generales de almacenamiento de agua en el follaje (SS_f) y micro depresiones (SS_m).	64
Tabla 4.1. Coste total ($C_T \text{ € ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) de aplicación de agua de riego con pívot alimentado directamente desde sondeo (valores mínimos en negritas).	90
Tabla 4.2. Coste total ($C_T \text{ € ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) de aplicación de agua de riego con el sistema sondeo-balsa de regulación-pívot (valores mínimos en negritas).	92

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 2.1. Procedimientos para diseño de una balsa de regulación que alimenta un sistema de riego.....	30
Figura 3.1. Esquema del sistema de manejo planteado con el modelo DOPW.	35
Figura 3.2. Diagrama del proceso de optimización para minimizar los costes totales de aplicación de agua (C_T) en equipos pívot alimentado directamente desde sondeo.	35
Figura 3.3. Esquema del sistema de manejo planteado con el modelo DEPIRE.	37
Figura 3.4. Diagrama del proceso de optimización para minimizar los costes totales de aplicación de agua (C_T) en equipos pívot alimentado desde balsa.	37
Figura 3.5. Sistema de manejo del agua planteado con el modelo DRODN.	39
Figura 3.6. Diagrama del proceso de optimización para minimizar los costes totales de aplicación de agua (C_T) en redes de riego a la demanda.	39
Figura 3.7. Distribución del área regada en Castilla-La Mancha (MAGRAMA, 2000).	41
Figura 3.8. Sección transversal de la balsa de regulación y variables que la describen (Pulido-Calvo et al., 2006).	44
Figura 3.9. Procedimiento general para calcular evapotranspiración del cultivo (ET_c).	47
Figura 3.10 Curvas de máximo caudal para obtener el Q_{max} con metodología L_m y $RDDC$	48
Figura 3.11. Esquema del cambio de variable en la curva Q-H de una bomba.	52
Figura 3.12. Esquema de las curvas características de una bomba (Moreno et al., 2007a).....	53

Figura 3.13. Esquema de las curvas de infiltración y pluviometría en un equipo pívot.	63
Figura 3.14. Diagrama de flujo generalizado del modelo DOPW	69
Figura 3.15. Diagrama de flujo generalizado del modelo DEPIRE	72
Figura 3.16. Organigrama de cálculo para determinar las dimensiones óptimas de la balsa semienterrada (L , $H1$ y $H2$).	73
Figura 3.17. Diagrama de flujo generalizado del modelo DRODN.....	76
Figura 3.18 Esquema de curvas aleatorias de demanda diaria ($RDDC$).	77
Figura 3.19. Organigrama de cálculo de volumen de regulación (V_r) en balsa.	83
Figura 3.20. Algoritmo de política de bombeo en red de riego alimentada desde balsas.	86
Figura 4.1. Descomposición y proporción del C_T para $S = 70$ ha, en coste de inversión y coste de la energía (incluido mantenimiento), bombeando directamente desde sondeo al pívot, para distintos niveles dinámicos.	91
Figura 4.2. Descomposición y proporción del C_T para $ND = 100$ m, en coste de inversión y coste de la energía (incluido mantenimiento), utilizando una balsa de regulación intermedia, para distintas superficies regadas.	93
Figura 4.3. Comparación del C_T con sistema pívot bombeando directamente desde sondeo al pívot (D) y utilizando una balsa de regulación intermedia (B) para distintas superficies y niveles dinámicos de bombeo (ND) 0, 50, 75, 100, 150 y 200 m.....	95
Figura 4.4. Descomposición del C_T para $ND = 75$ m, costes de inversión (C_a , incluido mantenimiento) y la energía (C_e), bombeando directamente desde sondeo al pívot (D) y utilizando una balsa de regulación intermedia (B), para distintas superficies regadas.	96
Figura 4.5. Descomposición del C_T para una superficie regada de 100 ha y distintos ND , en: (a) coste de extracción del agua (C_w) y coste de aplicación (C_A) para el caso	

de bombeo directo desde el sondeo al pivot (D) y balsa de regulación intermedia (B); y (b) descomposición del C_T en coste de inversión (a) y operación (e) para los casos anteriores.....	98
Figura 4.6. Volumen de balsa, útil (V_u) y mínimo (V_r) en la red de riego con las metodologías de L_m y de $RDDC$	101
Figura 4.7. Variación del coste total de suministro de agua a la red de riego por unidad de área (C_T € ha ⁻¹ año ⁻¹) y de volumen (C_w , cent € m ⁻³) en función del nivel dinámico (ND), con sus componentes de inversión (C_a) y de energía (C_e), para las metodologías de L_m y de $RDDC$	103
Figura 4.8. Coste anuales total (C_T , € ha ⁻¹ año ⁻¹), desglosados en a) costes energéticos (C_e) y b) costes de inversión (C_a), tanto en extracción de agua del sondeo (w) como en el rebombeo a la red de riego (R) con las metodologías de L_m y de $RDDC$	105
Figura 4.9. Potencia de bomba consumida en la extracción de agua (P_w) y en el rebombeo a la red de riego (P_R) y caudal optimo en la extracción (Q_w) y en la red (Q_R) con las metodologías de L_m (a) y de $RDDC$ (b).	107
Figura 4.10. Horas consumidas en valle (VA), llano (LL) y total (TO), en la extracción de agua (w) y el rebombeo a la red de riego (R), a) con la metodología de L_m , y b) con la de $RDDC$	108

1. INTRODUCCIÓN

1.1. CONSIDERACIONES GENERALES

El uso eficiente del agua y de la energía es de vital importancia para el incremento de la productividad en la agricultura de regadío, principalmente en zonas áridas y semiáridas; además permite ser sostenible ambientalmente. En este contexto, el óptimo uso de agua y de energía va implícito con la necesaria modernización del riego presurizado, donde las demandas energéticas son altas (Moradi-Jalal, 2003, 2004; IDAE, 2011; Reca et al., 2014).

El consumo de energía eléctrica depende principalmente de la eficiencia de las bombas elevadoras y el coste de operación de las estaciones de bombeo depende además de las tarifas eléctricas. La optimización global del funcionamiento de un sistema de distribución de agua requiere la evaluación de las diferentes alternativas de bombeo y la adecuación del funcionamiento a las tarifas contratadas con el fin de minimizar el coste anual total, teniendo en cuenta la anualidad de la inversión y los gastos de operación (energéticos y de mantenimiento), con las correspondientes tasas de actualización de los costes (Merriam y Keller, 1983; MAGRAMA, 2000; Pulido-Calvo, 2001).

Se prevé que el consumo de energía en el mundo se incrementará en un 56% en los próximos 30 años, incluido el uso de los combustibles fósiles (EIA, 2013). En Europa ha aumentado el precio de la energía (2008-2012) de media un 4% anual (COM, 2014). En países como España, donde el coste de la energía eléctrica está experimentando un gran incremento (más de un 100% desde 2008), unido a la gran dependencia energética de sus regadíos al tener más del 70% de los 3,4 millones de hectáreas regadas con riego a presión (48% de riego localizado y 22% de aspersion) (ESYRCE, 2013) y a la cada vez menor disponibilidad de agua para riego por incremento de las necesidades urbanas y medioambientales, resulta imprescindible desarrollar herramientas y modelos que ayuden a mejorar la eficiencia en el uso del

agua y la energía en el regadío (Pulido-Calvo y Gutiérrez-Estrada, 2011; Moreno et al., 2012). Uno de los objetivos del Plan de Acción Energética en España es mejorar la eficiencia energética a través de la disminución de consumos de agua en regadíos y la mejora del manejo y del rendimiento de los sistemas de bombeo (IDAE, 2011).

En regiones mediterráneas como el caso de España donde más del 60% del agua de riego procede de acuíferos, es importante disponer de herramientas de ayuda a la toma de decisiones para el adecuado manejo del agua y la energía (ESYRCE, 2008). La procedencia del agua utilizada para riego en regiones como la Mancha Oriental, con más de 110 000 ha regadas, es 92% de sondeos, 6% de ríos o manantiales y 2% mixtos (JCRMO, 2012); esta necesidad de extraer agua desde acuíferos, a profundidades entre 50 y 200 m, y donde el 95% de la superficie es regada con riego a presión (56% de riego localizado y 39% de aspersión) (ESYRCE, 2013) obliga a disponer de herramientas para el adecuado manejo del agua y de la energía.

El aumento del consumo de energía es un resultado negativo de algunas estrategias de modernización del riego, pero los impactos económicos de este incremento son aún mayores con el aumento del precio de la energía. Tal es el caso de España, donde el precio de la energía ha aumentado dramáticamente en los últimos años y las antiguas tarifas energéticas para riego han desaparecido. Ederra y Murugarren (2010) compararon datos del 2005 y 2009 para analizar el incremento de la factura eléctrica en un área regada de 802 ha las cuales fueron muy sensibles al aumento de los precios de la energía debido a la gran altura de bombeo en cabecera (196 m). El suministro anual de agua varió entre 4 000 y 5 000 m³ ha⁻¹. La necesidad de potencia fue de 1 750 kW. El coste de potencia se incrementó en un 378%, el coste de la energía aumentó en un 66% y la factura eléctrica se incrementó en un 82% durante este periodo. Esto no sólo fue debido al aumento de los costes energéticos, sino también al manejo del riego en los periodos de facturación pico y a la forma de contratación a proveedores de energía.

En grandes zonas de riego la opción más común es el uso de balsas de almacenamiento y regulación de agua junto con estaciones de bombeo que proveen a los sistema de riego de la presión y el caudal adecuado para su correcto funcionamiento (Moreno et al., 2007a). Las balsas de regulación entre la fuente de agua y la red de riego permite regular la demanda de agua, y si son manejados adecuadamente pueden reducir sustancialmente los costes energéticos al poder aprovechar la captación del agua en periodos de bajos costes energéticos, mejorando el funcionamiento global de las estaciones de bombeo (Hirose, 1997; Metha y Goto, 1992 y Pulido-Calvo et al., 2006).

El problema fundamental que afecta a la explotación óptima de los sistemas de distribución de agua es el análisis y previsión de la demanda de agua, ya que es la magnitud de referencia, y en consecuencia, la base de toda la planificación (Moreno, et al., 2007a). Toda estrategia que permita al regadío minimizar los costes eléctricos tendrá acogida, ya sea mediante herramientas que optimicen el diseño de las redes de distribución de agua y de las estaciones de bombeo, o que ayuden al adecuado manejo y mantenimiento de estos sistemas (Ederra y Murugarren, 2010). Dado además el continuo crecimiento del coste de la energía, la integración de energías renovables al regadío, y principalmente la fotovoltaica, resulta la opción más viable desde el punto de vista económico (Carrillo et al., 2014).

1.2 LA DEMANDA DE AGUA Y ENERGÍA EN EL REGADÍO.

Para plantear un proceso de optimización del uso del agua en la agricultura de riego, es imprescindible definir las necesidades de agua de los cultivos, por lo que una correcta delimitación y definición del patrón del cultivo que considere tipos de cultivos, superficie ocupada por cada uno redundará en las mejores estimaciones posibles sobre las necesidades de agua de la red de riego. Es bien conocido el problema de asignación de recursos hídricos en zonas regales donde interviene

factores técnicos, económicos, sociales, culturales y ambientales que dificultan aún más tal reparto de agua.

La estimación de la demanda de agua del cultivo depende de muchos factores del suelo, planta y elementos del clima en la que se debe definir aplicar una u otra metodología para obtener tales valores. La ecuación de Penman-Monteith (Allen et al., 2006) es actualmente la más aceptada para la estimación de la demanda evaporativa de referencia. Existen circunstancias en las que no es posible aplicar esta ecuación al no disponer de suficientes datos climáticos para ello, por lo que resulta aconsejable el uso de ecuaciones alternativas, siendo el método de Hargreaves y Samani (1985) uno de los que ha dado mejores resultados para climas mediterráneos (Mantovani et al., 1991). La expresión de Hargreaves y Samani sólo requiere datos de temperatura, e incluye el término de la amplitud de la temperatura relacionado con el grado de nubosidad y con la humedad (Jensen et al., 1990). La estimación de ETo a través del uso de valores de evaporación medidos a través de tanque evaporimétrico es también un método sencillo bastante aceptado (Doorenbos y Pruitt, 1977). Por otra parte el conocimiento de las etapas fenológicas de los cultivos es fundamental para ajustar los coeficientes de cultivo (kc) y el consumo de agua duración la campaña de riego, aspecto clave para la optimización del diseño y gestión de las infraestructuras de reparto del agua de riego. Sobre esa base en España existe desde el año 2001 el Servicio Integral de Asesoramiento al Regante (SIAR) con el objeto de proporcionar a los agricultores y técnicos agrarios información de base para calcular necesidades de riego de los cultivos y, así, mejorar la eficiencia en la utilización del agua y de la energía (SIAR, 2015).

Las redes de riego tienden a ser dimensionadas para funcionar a la demanda, durante el tiempo de operación a lo largo del día el sistema de impulsión debe garantizar suficiente caudal y presión a las parcelas. Sin embargo la demanda de agua en la red de riego sufre grandes variaciones durante la temporada de riego y a lo largo

del día, por diversos factores climáticos, tipo y fase de crecimiento del cultivo, eficiencia de riego y costumbres de riego de los productores (Lamaddalena, 1997).

Uno de los principales problemas en el diseño de redes de distribución de agua es obtener el tipo de bomba que mejor se adapte a la demanda de agua bajo unas necesidades específicas de presión en cabecera. Este ajuste es particularmente complejo para el diseño de redes a la demanda donde la estación de bombeo debe suministrar un amplio rango de presiones y caudales con máxima eficiencia energética como una función del número de hidrantes que son operados simultáneamente. Moreno et al. (2009) propusieron un algoritmo para obtener los tipos deseables de curvas características y curvas de eficiencia considerando la relación teórica entre las dos curvas para una bomba específica. Para un adecuado diseño de estaciones de bombeo en redes de distribución el caudal de diseño en cabecera debe ser determinado. Varias metodologías han sido desarrolladas a fin de obtener el caudal de diseño en cada tramo de una red de riego y se han llevado a cabo investigaciones para validar dichas metodologías. Las metodologías se pueden dividir en empíricas, estadísticas (destacando la de Clément (1966)), y métodos estocásticos basados en apertura aleatoria de los hidrantes (Moreno et al., 2007b).

La fórmula de Clément asume una distribución aleatoria de apertura de hidrantes en una red que tiene n hidrantes con un caudal de descarga d , donde no es probable que todos los hidrantes estén abiertos al mismo tiempo. Por tanto el caudal de descarga total (Q_c) en la red nunca será $Q_c = n \times d$. La fórmula general de Clément (Clément y Galand, 1986) para n es (ecuación 2.1):

$$Q_d = Q_r + U \sqrt{\sum_{i=1}^n p_i (1 - p_i) d^2} \quad (2.1)$$

donde Q_d = caudal de diseño; Q_r = caudal continuo en tramo de tubería que tiene n hidrantes aguas abajo abiertos; U = percentil según nivel de confianza de una

distribución normal; p = probabilidad de apertura del hidrante; d = caudal de descarga del hidrante.

La metodología de Clément es el modelo más comúnmente usado por su fácil aplicación al asignar a cada hidrante una probabilidad media de apertura; sin embargo después de ser analizada por varios investigadores (Mavropoulos, 1997; Planells et al. 2001; Moreno, 2005) la metodología no siempre se ajusta adecuadamente a los caudales medios de la red de riego, generando en muchos la subestimación de los caudales.

Moreno et al. (2007b) propusieron y validaron una nueva metodología “Radom Demanding Daily Curve” (RDDC) para calcular el caudal de diseño en redes de riego a la demanda, basada en la teoría de apertura aleatoria de hidrantes; y demostraron que la metodología de Clément al considerar la probabilidad de apertura de hidrantes, subestima el caudal de diseño entre 35 y 40%. Muchos estudios sobre este tópico han sido realizados, con similares resultados (Calejo et al., 2008).

La distribución de la descarga de agua a lo largo de la campaña de riego es un parámetro esencial para un estudio adecuado del uso de la energía por las estaciones de bombeo. Moreno et al. (2007a) obtuvieron la distribución de la descarga de agua en una estación de bombeo a través de la medición de parámetros eléctricos, lo cual resultó ser buen estimador. Normalmente sólo se considera el caudal y presión en cabecera cuando se diseñan estaciones de bombeo sin tener en cuenta la variación del caudal durante la campaña de riego. Sin embargo, investigaciones han mostrado que la mayoría de las estaciones de bombeo abastecen las redes con caudales bajos o medios principalmente y las descargas de altos caudales son poco frecuente (Moreno et al., 2007b, Lamaddalena y Khila, 2012). Por lo tanto, es necesario mejorar la eficiencia para caudales bajos y medios y no solamente para altos caudales (caudales de diseño).

Moreno et al. (2010) desarrollaron una herramienta de análisis de sistema de extracción de agua desde sondeos llamada AS para evaluar el funcionamiento de un sistema de bombeo con bomba sumergida, el cual determina el momento óptimo de reparación del bombeo mediante la comparación de costes de extracción y operación subóptimo.

1.3. DISEÑO DIMENSIONADO Y GESTIÓN DE SISTEMAS DE BOMBEO EN EL REGADÍO.

El bombeo es el principal consumidor de energía en la extracción de agua desde acuíferos y su distribución para distintos usos. El diseño óptimo de estaciones de bombeo, está basado principalmente en la selección del tipo y número de bombas que proporcionen los menores costes de operación y mantenimiento para unas determinadas demandas de agua y presión. Las áreas potenciales para el ahorro energético están principalmente en la adecuada selección de la bomba y la adaptación de su funcionamiento a las tarifas eléctricas (Schroeder y Fischbach, 1983; Kranz et al., 1992 y Moradi-Jalal y Karney, 2008).

A lo largo del día los costos de las tarifas eléctricas suelen ser variables, con lo que el uso de balsas de regulación se ha convertido en una alternativa de manejo del agua de riego para que el agua pueda ser bombeada desde la fuente hasta la parcela durante las horas de menor costo energético, y con la mayor eficiencia de bombeo posible (Moradi-Jalal et al., 2004; Pulido-Calvo et al., 2006; Moreno et al. 2007a). Moreno et al. (2010) desarrollaron una herramienta para explotación óptima de sondeo llamada Diseño Óptimo de sondeos (DOS) la cual define la potencia de la bomba según el coste de la energía y los periodos tarifarios disponible.

En los últimos años la inclusión de bombas de velocidad variable en los sistemas de impulsión ha permitido que el funcionamiento de los grupos de bombeo se adapte al caudal solicitado por la red de distribución modificando la velocidad de

giro continuamente. Las principales ventajas de la operación a velocidad variable (IDAE, 2008) con respecto a otro tipo de regulación son:

- a) las presiones pueden mantenerse en valores muy próximos a los requeridos;
- b) las pérdidas de agua por fugas, directamente relacionadas con la presión, se minimizan porque puede mantenerse la presión en los niveles mínimos;
- c) mantenimiento del rendimiento próximo al óptimo del grupo de bombas;
- d) disminuye el número de bombas necesarias para efectuar la regulación, haciendo el proceso más sencillo;
- e) se disminuyen los transitorios asociados con el arranque o parada de las bombas, ya que el accionamiento de frecuencia variable permite llevar la bomba y el motor gradualmente a su velocidad nominal. La eliminación de la alta intensidad de corriente de arranque se traduce en ahorros energéticos.

El proceso de extracción de agua subterránea es optimizado cuando la suma de los costes de inversión y operación es mínima. Las principales variables a ser consideradas en el proceso de optimización son:

- La máxima tasa de extracción de agua del pozo, obtenida con una prueba de achique (Jacob, 1947; Bierschenk, 1963; Hantush, 1964).
- Nivel dinámico del pozo y su variación a lo largo de la temporada de riego.
- Volumen a extraer del pozo.
- Coste de la energía y de las bombas.

En el proceso de selección de bombas para la extracción de agua desde un acuífero se suele tener en cuenta el nivel dinámico máximo en el sondeo y que el caudal esté cerca del máximo que es capaz de suministrar el pozo. Sin embargo normalmente no se considera la evolución del nivel dinámico del pozo a lo largo de la

campana de riego y cómo éste puede afectar la eficiencia energética cuando se bombea en los diferentes meses de la campana de riego (Moreno et al., 2009).

Otro componente importante a tener en cuenta en la selección de bombas es el diámetro de las tuberías en la impulsión y distribución; siendo el criterio económico el más recomendado (Labye et al., 1988; Lansey y Mays 1989).

1.4. LAS BALSAS DE ALMACENAMIENTO Y REGULACIÓN.

Las balsas de almacenamiento y regulación entre la fuente de agua y la red de riego se han convertido en una alternativa de uso del agua de riego ya que permiten regular la disponibilidad y demanda de agua y, si son manejados adecuadamente, pueden reducir sustancialmente los costes energéticos al aprovechar captar el agua en periodos de bajos costes energéticos y mejorar el desempeño de las estaciones de bombeo (Hiroshé, 1997; Pulido-Calvo et al., 2006; Reza et al., 2014).

Asimismo, la alta inversión que supone la construcción de una balsa de regulación puede verse compensada por la disminución de los costes energéticos, dado que; permite un funcionamiento más regular de las estaciones de bombeo con mejores rendimientos en comparación con la impulsión directa a la red de distribución, posibilita desplazar el bombeo de extracción de agua a las horas de menor coste de la tarifa eléctrica. Durante dicho tiempo se acumulará agua en la balsa de regulación, y será consumida en las horas donde el precio de la energía eléctrica es mayor. Por otra parte, donde los caudales disponibles en la fuente de agua no sean suficientes se posibilita acumular agua en horas de menor demanda y poder ser usadas en las horas de mayor demanda (Edwar et al., 1992; Hiroshé, 1997; Pulido-Calvo y Gutiérrez-Estrada, 2011).

El coste del depósito o balsa de regulación, está relacionado con el volumen del mismo, el cual depende de las diferencias entre el caudal demandado y el caudal impulsado, estando determinado por el régimen de bombeo (potencia y características

de las bombas, caudal impulsado en cada hora, número de bombas en marcha y número de horas de funcionamiento).

La capacidad de almacenamiento debe ser tal que permita elevar y acumular el agua en las horas con el menor coste energético y establecer una política de bombeo durante la campaña de riego, adaptado el esquema de operación a la demanda de la red de riego, con especial atención al periodo crítico de demanda de agua de los cultivos (Reca et al., 2014).

Pulido-Calvo (2001), señala que el diseño y la gestión de los sistemas de impulsión y de almacenamiento de agua se plantea como un problema de optimización teniendo en cuenta en la función de costes las siguientes variables:

1. *El consumo energético de la estación de bombeo.* Constituido por un término de potencia y un término de energía. El primero depende de la potencia contratada y del modo de facturar dicha potencia, factores ambos que se determinan una vez que han sido seleccionados los grupos de bombeo. El segundo depende del consumo de energía eléctrica de las bombas, que es función de la altura de presión y del caudal impulsado, así como del número de horas de funcionamiento y el contrato del suministro eléctrico elegido.
2. *El coste de la estación de bombeo,* que está directamente relacionado con la potencia de los grupos motor-bomba, que asimismo depende del caudal impulsado y de la altura de bombeo.
3. *El coste de la tubería de impulsión,* que depende del diámetro seleccionado, el cual determina las pérdidas de carga que se van a producir y, en consecuencia, la altura de energía que deberán proporcionar las bombas.
4. *El coste del depósito o balsa de regulación,* que está relacionado con su volumen, el cual depende de las diferencias entre el caudal demandado y el caudal impulsado, estando determinado por el régimen de bombeo (potencia y

características de las bombas, caudal impulsado en cada hora, número de bombas en marcha y número de horas de funcionamiento).

La presencia de una balsa de regulación situada entre la fuente de agua y el sistema de riego permite independizar los caudales bombeados de la variabilidad del uso del agua en la red de distribución. De este modo la balsa se podrá utilizar como almacén de agua para tratar de reducir los costes energéticos en la medida de lo posible; al poder adaptar el esquema de operación de los grupos de bombeo al tipo de discriminación horaria de las tarifas eléctricas contratada (Mehta y Goto, 1992; Hirose, 1997; Pulido-Calvo et al., 2006; Schoups et al., 2006; Reca et al., 2014).

Para satisfacer las demandas de agua de una red de riego Pulido-Calvo et al. (2003) proponen como solución más adecuada, utilizar solamente las horas de tarifas más bajas cuando el número de horas de funcionamiento es bajo, y por el contrario cuando el número de horas de funcionamiento es elevado habrá que considerar la alternativa de tener que utilizar tanto las horas de coste bajo como las horas de coste medio o, incluso, alto. Moreno et al. (2007a) encontraron que con caudales pequeños pueden aumentar los costes energéticos si se necesita tener que bombear durante periodo tarifarios más caros, mientras que con caudales grandes puede utilizarse solo periodos tarifarios baratos, pero requeriría mayor inversión en bomba y tuberías. La presencia de la balsa de almacenamiento y regulación permite aprovechar los periodos tarifarios más baratos, pero se incrementan los costes de inversión.

Los beneficios de las balsas se pueden resumir en lo siguiente:

- a) El sistema de bombeo a la balsa trabaja próximo a su punto de rendimiento máximo ya que la curva de demanda de altura y caudal son muy estables (Losada, 1995).
- b) Se puede desplazar el bombeo en horas bonificadas de costes de energía (López-Luque et al., 1993; Pulido-Calvo et al., 2006; Moreno et al., 2007a).

- c) Proporciona garantía de suministro de agua en donde la oferta de agua es extremadamente estacional (Mehta y Goto, 1992).
- d) Ofrece reserva de agua adicionales ante averías en bombeo, que pueden suceder a lo largo de la campaña de riego (Abreu, 1992).

Un elemento importante en la planificación de redes de riego con balsas es determinar el volumen que permite regular la oferta y demanda de agua. Se han desarrollados numerosos gráficos, tablas y ábacos para optimizar tanto la capacidad de la balsa como la construcción al buscar siempre un equilibrio en el movimiento de tierra, donde la excavación y el relleno sean muy similares para que los costes sean mínimos; destacando los trabajos reportados por CAMB (1986) y Amigó y Aguiar (1994). Abreu et al. (1992) determinan el volumen de almacenamiento de balsa a través de una gráfica de balance donde el volumen es la máxima diferencia vertical acumulada entre la oferta y la demanda. Edward et al. (1992), Meta y Goto (1992) añaden criterios de rentabilidad del cultivo y estrategias de manejo para definir el volumen óptimo de balsa las cuales fueron factible cuando la disponibilidad de agua subterránea está limitada. Medina et al. (1997) plantean considerar elementos como capacidad de almacenamiento del suelo y aportes de precipitación, sin embargo en condiciones mediterráneas estos elementos pueden ser suprimidos (Reca et al., 2014). Trabajos recientes han destacado la importancia de considerar las pérdidas por evaporación en la balsa (Molina, 2004; Martínez-Álvarez et al., 2008; Martínez-Granados et al., 2011; Reca et al., 2014) al estimar que las pérdidas por evaporación en balsa son del orden de 7 – 8,3% del agua requerida para riego.

Sabet y Helweg (1989) analizaron el efecto de incluir un reservorio alimentado desde sondeo en una red urbana de distribución de agua sobre los costes de inversión y operación del sistema logrando una reducción del 25 % en el coste total del sistema de impulsión; Mehta y Goto (1992) desarrollaron un modelo de cálculo del tamaño óptimo de balsa y lograron reducir pérdidas de agua en un 20% y garantizar el suministro de agua en un área de riego con diferentes fuentes de agua;

Pulido-Calvo et al. (2006) desarrollaron un software que integra el diseño de balsas en la gestión y planificación del sistema de impulsión logrando reducir en 12% los costes totales anuales; en ese mismo orden de ideas Reza et al. (2014) propusieron un modelo para optimizar el sistema de bombeo considerando las pérdidas de agua por evaporación en las balsas.

El desarrollo de modelos de optimización de tamaño de balsas de regulación con un enfoque holístico para encontrar el mínimo coste anual total de aplicación de agua por unidad de área (C_T) a sistemas de riego se puede realizar en tres pasos (**Figura 2.1**). De esos tres pasos, la capacidad de regulación de la balsa en el proceso de planificación es más importante para el sistema de manejo planteado (Hirose, 1997).

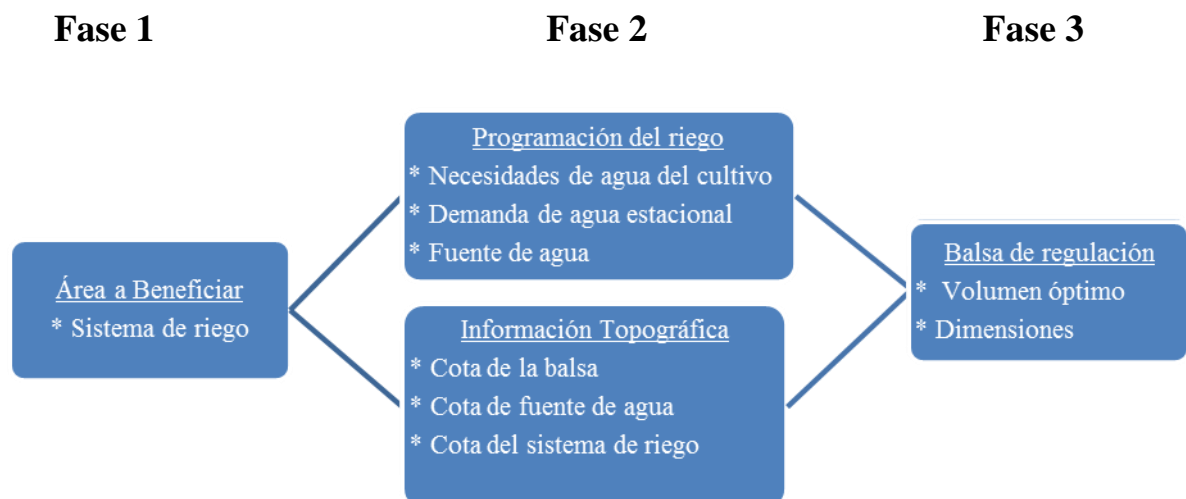


Figura 2.1. Procedimientos para diseño de una balsa de regulación que alimenta un sistema de riego.

1.5. DISEÑO, DIMENSIONADO Y MANEJO DE SISTEMAS DE RIEGO PRESURIZADOS EN PARCELAS.

El objetivo principal en el diseño hidráulico de sistemas de riego por goteo es mejorar la uniformidad de emisión (UE) desde el punto de vista económico, los factores que determinan la UE son costes de inversión, agua y energía, además el rendimiento de los cultivos responde a la forma de aplicación de agua. El diseño hidráulico se debe enfocar en minimizar los costes (inversión y operación) de aplicación de agua (Carrión et al., 2013).

La aplicación de agua en sistemas de riego por aspersión depende del modelo de distribución de agua de los aspersores, espaciamiento y solape, y velocidad del viento (Tarjuelo et al., 1999). Keller y Bliesner (1990) señalan que el modelo de distribución de aspersores depende del tipo de aspersor y su presión de trabajo. La adopción de sistemas de riego más uniformes implica mayor coste de inversión y los beneficios asociados con este aumento de costes debe ser valorados para elegir la uniformidad que proporcione la mayor rentabilidad en la explotación (Brennan, 2008). Una buena aproximación sobre la mejor uniformidad del riego ocurre cuando los intervalos de riego son menores a 4 días (Carrión et al., 2014).

En el caso de sistemas de riego tipo pívots, Allen (1989) (USUPIVOT) y Andrade y Allen (1997) (SPRINKMOD) integran el diseño de equipos pívot con variables de suelo, cultivo, aspersores y condiciones de trabajo de la máquina. Valín et al. (2012) desarrollan el modelo DEPIVOT para diseñar, cambiar y mejorar el manejo de equipos pívots que permiten adaptarse a cualquier forma de aprovechamiento del agua. Moreno et al. (2012) proponen una herramienta para el Diseño Óptimo de Pívots (DOP) alimentados desde sondeos enfocado a minimizar el coste de aplicación del agua de riego que considera variables hidráulicas, hidrológicas y energéticas, con el que se pone de manifiesto que la mejor opción de bombeo para minimizar el coste de extracción de agua es evitar trabajar en periodos de alto coste energético y reducir costes de inversión.

2. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

Existen numerosas referencias de diseño, dimensionado y gestión de sistemas de bombeo, sistemas de riego en redes y parcelas (equipos pívot, sistema de riego por goteo, etc.), y balsas. Sin embargo, no se encuentran referencias de estudios que realicen el diseño y dimensionado del sistema en forma conjunta, considerando las interacciones entre los subsistemas (extracción, almacenamiento y sistema de riego) por lo que esta investigación conduce al dimensionado óptimo de forma global que ayuden a aplicar estrategia de gestión con el objetivo de obtener una alta eficiencia en el uso del agua y de la energía.

La presente investigación surge a raíz del proyecto de investigación financiado por el Plan Nacional de I+D+i de España (AGL2011-30328-C02-01), titulado “Acciones para la mejora de la eficiencia energética en el regadío (AMERE)” compuesto por personal multidisciplinario en el ámbito del manejo del agua y de la energía y está a cargo de Investigadores del Centro Regional de Estudios del Agua (CREA), cuyo objetivo es el desarrollar distintos softwares de ayuda a la gestión del agua y la energía en el regadío.

2.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar, con un enfoque holístico, herramientas y modelos para optimizar el dimensionado y la gestión conjunta de sistemas de bombeo, balsas de almacenamiento y regulación y sistemas de riego a presión alimentados desde sondeos que permitan minimizar los costes totales de aplicación de agua, mejorando de esa forma la eficiencia del uso del agua y la energía.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Desarrollar un modelo para minimizar el coste total de aplicación de agua en equipos pivots alimentados directamente desde sondeo, DOPW (**Design of centre pivot with water supplied from wells**).
2. Desarrollar un modelo para optimizar el diseño y manejo de equipos pivot utilizando balsa de regulación y almacenamiento intermedia, DEPIRE (**design of centre pivot with regulating reservoir**) para tratar de minimizar el coste total de aplicación de agua y poderlo comparar con la situación de alimentación directa.
3. Desarrollar el modelo DRODN (**design of reservoir on demand irrigation network**) para optimizar el diseño y manejo de estaciones bombeo y balsa de almacenamiento y regulación que permita alimentar una red de riego a la demanda, con el mínimo coste total de entrega de agua a la red.

3. MATERIALES Y METODOS

3.1. HERRAMIENTAS DESARROLLADAS.

El objetivo del proceso de diseño y gestión de sistemas de bombeos y balsas de almacenamiento y regulación para alimentar sistemas de riego a presión, consiste en reducir al mínimo el coste anual de aplicación de agua por unidad de área durante la temporada de riego, por tanto se consideraron los costes energéticos y de inversión que dependen del agua disponible, del agua demandada, la operación y el manejo del sistema de riego para lo cual se desarrollaron tres modelos de cálculo de los cuales los dos primeros están publicados en la revista *Biosystems Engineering* con el título “Optimal reservoir capacity for centre pivot irrigation water supply: Maize cultivation in Spain”, volumen 135 páginas 61-72 (Anejo 7.2). El resumen de las herramientas desarrolladas se presenta a continuación:

- 1. El modelo DOPW (Design of centre pivot with water supplied from wells):** El objetivo del DOPW es minimiza el coste anual total de aplicación de agua de riego por unidad de área (C_T , en $\text{€ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) a lo largo de la temporada de riego. Los C_T corresponden a la suma de los costes de inversión (C_a), energía (C_e) y mantenimiento (C_m), considerando el proceso con un enfoque holístico, desde el origen del agua hasta su aplicación en parcela para ponerla a disposición del cultivo (**Figura 3.1**). Los costes de inversión incluyen el sondeo, la línea eléctrica, las bombas, la red de tuberías y el equipo pívot. Los costes de los elementos de control del equipo pívot (panel de control, sistemas de alineamiento y seguridad, bases de hormigón, caseta de bomba, etc.) fueron considerados como costes fijos en el proceso de optimización para los diferentes tamaños de máquina (**Figura 3.2**).

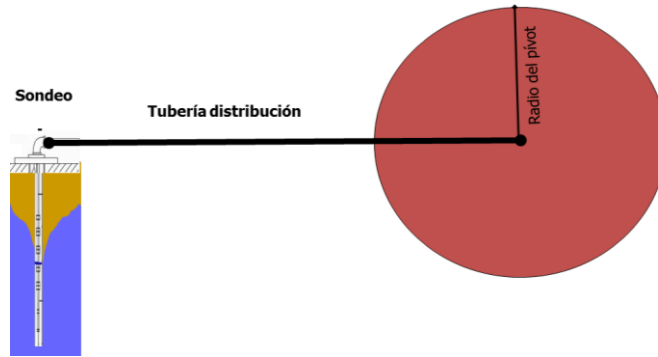
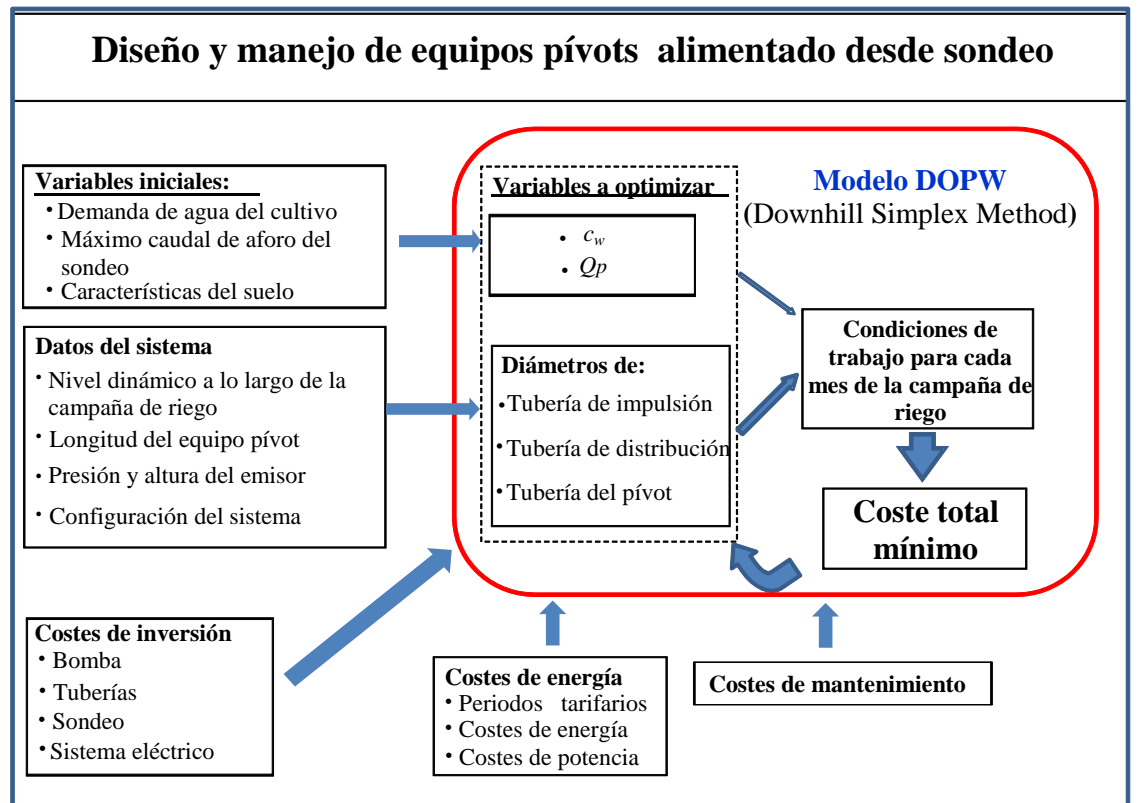


Figura 3.1. Esquema del sistema de manejo planteado con el modelo DOPW.



donde: c_w = coeficiente de la curva característica de la bomba; Q_p = caudal en cabecera del pívot.

Figura 3.2. Diagrama del proceso de optimización para minimizar los costes totales de aplicación de agua (C_T) en equipos pívot alimentado directamente desde sondeo.

Los datos que alimentan el modelo son: **a) datos de la parcela y el cultivo:** demanda de agua en cada mes de la campaña de riego, superficie a regar, diferencia de cota del terreno; **b) sondeo:** nivel dinámico del agua, caudal máximo que es posible extraer, rendimiento máximo de la bomba, periodos tarifarios; **c) agronomía del riego:** intervalo de riego, tiempo máximo de riego, eficiencia de aplicación, presión de trabajo del pívot; **d) parámetros económicos:** vida útil, tasa de interés del capital, tasa de incremento del coste de la energía, impuestos, costes; **e) otros:** horas disponibles.

- 2. El modelo DEPIRE (DEsign of center PIVot with regulating REservoir):**
El objetivo de DEPIRE es minimiza el coste anual total de aplicación de agua de riego por unidad de área (C_T , en € ha⁻¹ año⁻¹), suma de los costes de inversión (C_a), energía (C_e) y mantenimiento (C_m) y considerando el proceso con un enfoque holístico, desde el origen del agua hasta su aplicación en parcela para ponerla a disposición del cultivo, considerando por una balsa intermedia de regulación y almacenamiento (Figura 3.3). Los costes de inversión incluyen el sondeo, la línea eléctrica, el sistema eléctrico (línea de media tensión, cableado del sistema de bomba, cuadro eléctrico, etc.), las bombas, la red de tuberías, la balsa y el equipo pívot. Los costes de los elementos de control del equipo pívot (panel de control, sistemas de alineamiento y seguridad, bases de hormigón, caseta de bomba, etc.) fueron considerados como costes fijos en el proceso de optimización para los diferentes tamaños de máquina (Figura 3.4).

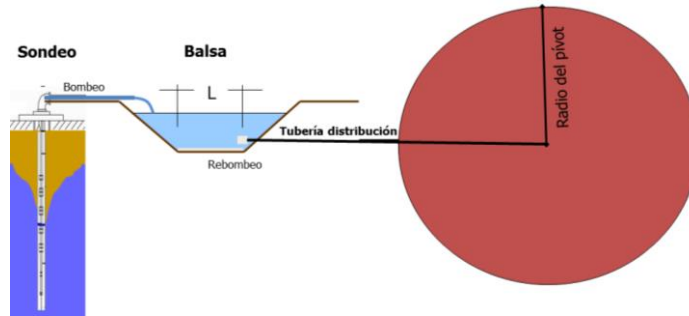
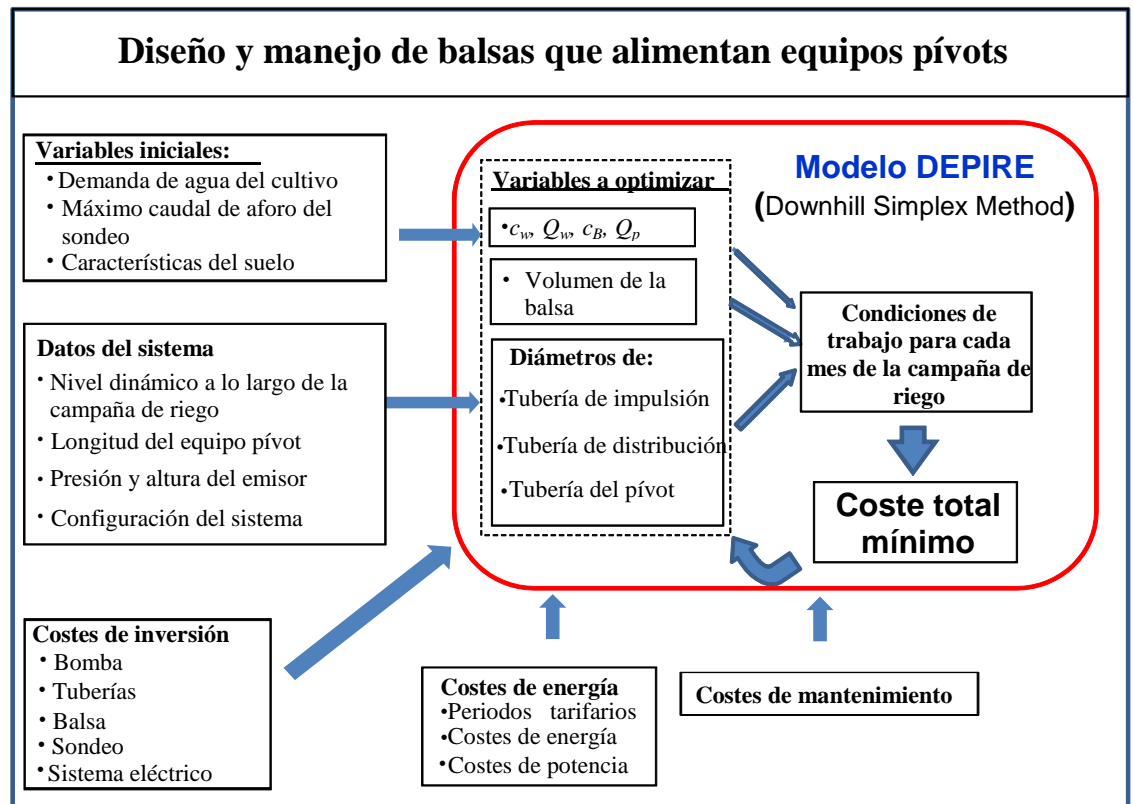


Figura 3.3. Esquema del sistema de manejo planteado con el modelo DEPIRE.



donde: c_w = coeficiente de la curva característica de la bomba en sondeo; Q_w = caudal bombeado a balsa; c_B = coeficiente de la curva característica de la bomba en la balsa; Q_p = caudal en cabecera del pívot.

Figura 3.4. Diagrama del proceso de optimización para minimizar los costes totales de aplicación de agua (C_T) en equipos pívot alimentado desde balsa.

Los datos que alimentan el modelo son: **a) datos de la parcela y el cultivo:** consumo de agua en cada mes de la campaña de riego, superficie a regar, diferencia de cota del terreno; **b) sondeo:** nivel dinámico del agua, caudal máximo que es posible extraer, periodos tarifarios; **c) agronomía del riego:** intervalo de riego, tiempo máximo de riego, eficiencia de aplicación, presión de trabajo del pivot; **d) balsa:** pérdidas de agua por evaporación, parámetros de balsa; **e) parámetros económicos:** vida útil, tasa de interés de capital, tasa de aumento del coste de la energía, impuestos, costes; **f) otros:** rendimiento máximo de las bombas, horas disponibles.

3. **El modelo DRODN (Design of Reservoir On Demand Irrigation Network):** Para optimizar el proceso de extracción y suministro del caudal y presión necesarias en cabecera a una red colectiva de riego a la demanda, se ha desarrollado el modelo **DRODN** (Figura 3.6) con un enfoque holístico que minimiza el coste anual total de suministro del agua a la red por unidad de área (C_T , en $\text{€ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), como suma de los costes de inversión (C_a), energía (C_e) y mantenimiento (C_m). Los costes de inversión incluyen el sondeo, la balsa, la línea eléctrica, las bombas, instalación en estaciones de bombeo y las tuberías necesarias llevar el agua desde el origen hasta la cabecera de la red (Figura 3.5).

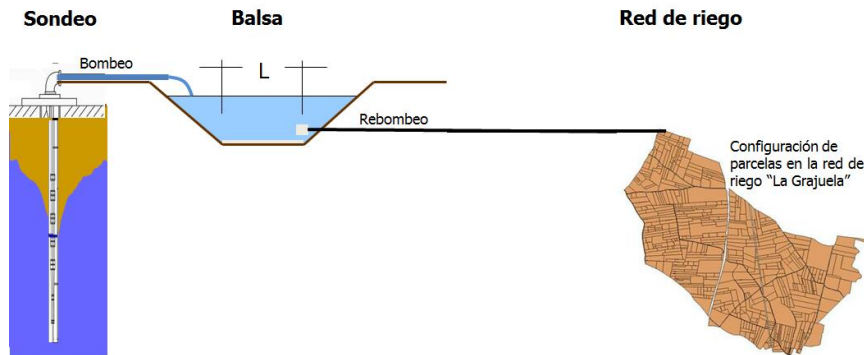
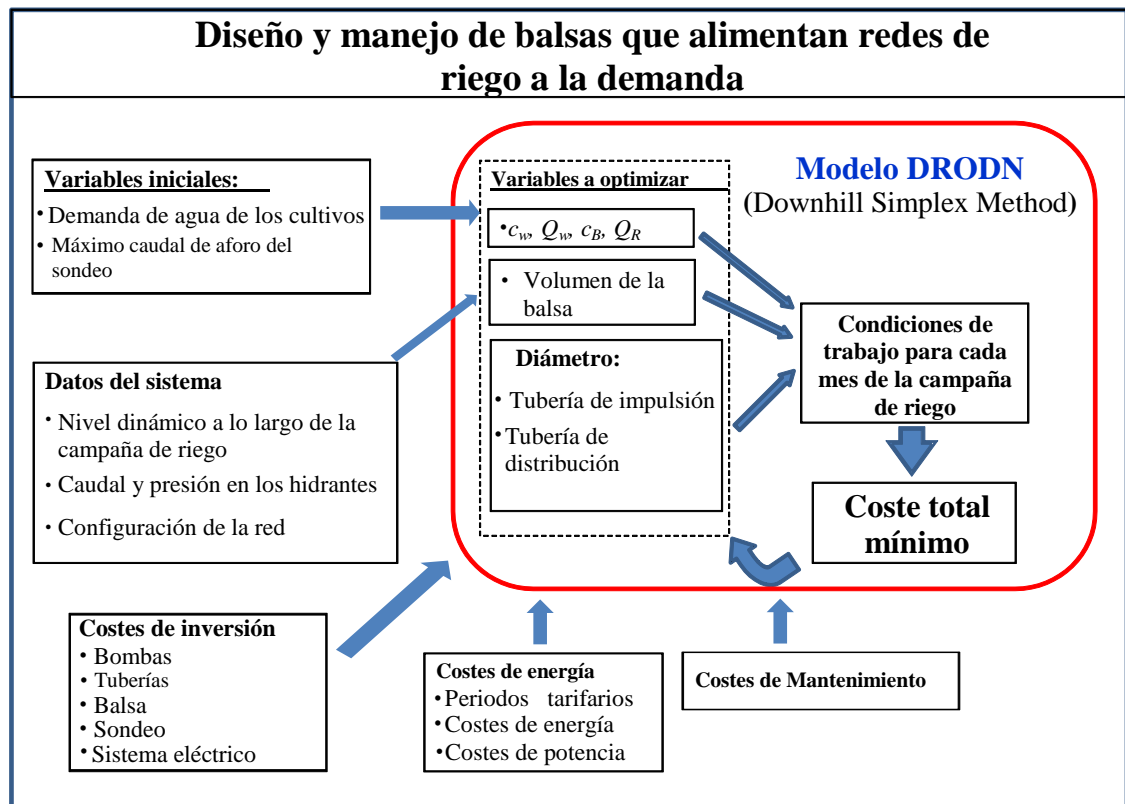


Figura 3.5. Sistema de manejo del agua planteado con el modelo DRODN.



donde: c_w = coeficiente de curva característica de la bomba en sondeo; Q_w = caudal bombeado en el sondeo; c_B = coeficiente de la curva característica de la bomba en la balsa; Q_R = caudal en cabecera de red de riego.

Figura 3.6. Diagrama del proceso de optimización para minimizar los costes totales de aplicación de agua (C_T) en redes de riego a la demanda.

Los datos que alimentan el modelo son: **a) datos de la parcela y el cultivo:** consumo de agua en cada mes de la campaña de riegos, superficie a regar, **b) sondeo:** nivel dinámico del agua, caudal máximo que es posible extraer del sondeo; **c) agronomía del riego:** demanda de agua en parcela, intervalo de riego, tiempo máximo de riego, eficiencia de aplicación del agua de riego, el caudal y la presión necesaria en la entrada de la red; **d) balsa:** pérdidas de agua por evaporación, parámetros de balsa; **e) parámetros económicos:** vida útil, tasa de interés del capital, tasa de incremento del coste de la energía, impuestos, costes; **f) otros:** rendimiento máximo de las bombas, horas disponibles.

3.2. ZONA DE ESTUDIO.

Los modelos se validaron en la Unidad Hidrogeológica (HS 08.29) en el Acuífero de La Mancha Oriental por ser una de las más importantes unidades hidrogeológicas de la cuenca del río Júcar, en la Región de Castilla – La Mancha (**Figura 3.7**) y cubre un área de 8 500 km² (IGME, 1980) de las cuales el 72% está en la provincia de Albacete, 21% en la provincia de Cuenca y 7% en la provincia de Valencia. La HS 08.29 suministra agua para riego a más de 110 000 ha con modernos sistemas de riego presurizados y para consumo urbano (incluyendo uso industrial) a una población de más de 275 000 habitantes. Para estos usos, el consume puede llegar a 340 hm³ año⁻¹, existiendo un alto riesgo de insostenibilidad ya que se estima que la recarga natural del acuífero es de 260 hm³ año⁻¹ (CHJ, 2014).

En la zona del Acuífero de La Mancha Oriental el 97,8% de la superficie es regada con sistemas de riego a presión (36,6% de riego localizado; 30,9% de aspersión y 30,3 con equipos pívot) con un superficie regada cercana a las 200 000 ha (**ESYRCE, 2013**).



Figura 3.7. Distribución del área regada en Castilla-La Mancha (MAGRAMA, 2000).

3.3. CASOS DE ESTUDIO.

3.3.1. Casos de estudio para aplicación de los modelos DOPW y DEPIRE.

En cada modelo desarrollado (DOPW y DEPIRE), y con el esquema de manejo planteado (Figuras 3.1 y 3.3), se evaluaron los costes totales anuales por unidad de área regada para tamaños de pivot de 30, 50, 70, 100, 125 y 150 ha (Tabla 3.1) regadas con agua extraídas desde sondeos a niveles dinámicos (*ND*) de 0, 10, 50, 75, 100, 125, 150 y 200 m, cubriendo siempre la demanda de agua de un cultivo ampliamente distribuido en la zona (provincia de Albacete) con grandes necesidades hídricas como el maíz (*Zea mays L.*) y cumpliendo un ciclo de producción que va desde abril a septiembre. El total de escenarios en cada esquema de manejo propuesto fue de 48, los cuales representan la mayoría de los casos reales encontrados en la HS 08.29. La herramienta permite aplicar la metodología desarrollada sobre cualquier

otra condición de costes, condiciones hídricas de cultivo, condiciones del acuífero, etc.

Tabla 3.1. Superficie a evaluar con el equipo pívot y su correspondiente radio.

Superficie (ha)	*Radio del pívot ajustado (m)
30	312
50	402
70	474
100	564
125	630
150	690

*Radio del pívot ajustado a múltiplo de 6 m.

3.3.2. Casos de estudio para aplicación del modelo DRODN.

El modelo DRODN se aplicó a una red colectiva de riego a la demanda de 171 ha distribuida en 177 parcelas con riego por goteo considerando la alternativa de cultivos existentes en la zona de estudio (81% de viñedo y 19% de olivar) para la campaña de riego va de mayo a septiembre, teniendo identificado el cultivo existente en cada parcela y su correspondiente hidrante

El estudio se llevó a cabo en una red colectiva de riego por goteo a la demanda de 171 ha para riego de viña (81%) y olivar (19%) distribuida en 177 parcelas, para la campaña de riego que va de mayo a septiembre, localizada en “La Grajuela”, provincia de Cuenca. El agua procede de un sondeo de 135 m de profundidad, con nivel dinámico de 100 m, donde hay instalada una bomba de 296 HP, que extrae un caudal teórico de 130 L s^{-1} , y la almacena en una balsa de 20 000 m^3 (de forma tronco piramidal invertida, con base rectangular, recubierta con una lámina de polietileno de alta densidad (PEAD)) desde donde se rebombea a la red de riego.

La estación de bombeo tiene 4 bombas iguales de 57 HP. Dos accionadas con variadores de velocidad y otras 2 con arrancadores electrónicos. Las bombas están controladas por un PCL (controlador lógico programable) el cual recibe datos desde los transductores de presión localizados en el colector de salida del bombeo para mantener una presión en la cabecera de la red de 45 m y garantizar una presión en hidrante de 25 m.

Se dispone de todos los datos de la red de riego (Figura 3.5), que está compuesta por tuberías de PVC (policloruro de polivinilo) con diámetros comprendidos entre 63 y 400 mm de 0,6 MPa. Cada parcela dispone de un hidrante, habiendo 149 hidrantes en total, con diámetros (internos) que van desde 32 mm (1”), hasta 50 mm (1,5”) y 63 mm (2”) dependiendo del tamaño de las parcelas. Los elementos que componen la toma en parcela son; ventosa, filtro caza piedras, electroválvula, piloto limitador de caudal y reductor de presión, contador y unidad de terminal remota (RTU) que envía información de caudal y presión en tiempo real para su control desde un ordenador central.

Para cada uno de los casos estudiados se evaluaron los costes totales anuales por unidad de área necesarios para garantizar el caudal y la presión en la cabecera de la red de riego durante toda la campaña de riegos, así como el tamaño de balsa de regulación, contemplando 9 escenarios de niveles dinámicos (0, 10, 50, 75, 100, 125, 150, 200 y 250 m) a fin de cubrir la mayoría de los casos posibles en estos tipos de redes de riego dentro de la HS 08.29.

3.4. CONSIDERACIONES COMUNES DE LOS MODELOS.

3.4.1. Hidráulica del agua subterránea.

Aunque los modelos de optimización permiten tener en cuenta los posibles cambios del nivel dinámico dependiendo del tipo de acuífero a lo largo de la temporada de riego, en éste trabajo no fueron considerados. Así mismo, los modelos

permiten tener en cuenta el caudal máximo disponible en el sondeo, aunque en este trabajo se consideró que el acuífero proporciona un caudal suficiente para cubrir las necesidades de agua del sistema del riego en cualquier momento que se demande.

El máximo nivel de abatimiento considerado entre el nivel estático y el nivel dinámico del sondeo fué de 20 m lo cual permite en todo momento extraer el caudal máximo disponible en el acuífero bajo las condiciones de explotación existentes en la HS 08.29. Las herramientas desarrolladas permiten introducir estos parámetros de forma que se puedan adaptar a cualquier caso de estudio.

3.4.2. Dimensiones optimas de la balsa.

Para tratar de minimizar los costes de inversión en los modelos DEPIRE y DRODN, se consideró una balsa en forma de tronco piramidal invertida de base cuadrada, semienterrada, cubierta con lámina de polietileno (**Figura 3.8**). En el diseño de la balsa se determina el V_T , que se corresponde con el volumen útil óptimo (V_u) incrementado 20% para incluir un margen de seguridad para emergencias en el manejo del agua y un resguardo para prevenir rebosamientos debidos a lluvias o a errores en la operación de la(s) bomba(s) según recomendaciones hechas por Jowitt y Germanopoulo (1992) y Amigó y Aguiar (1994).

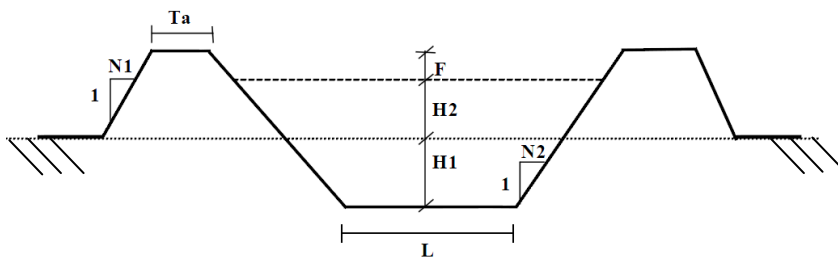


Figura 3.8. Sección transversal de la balsa de regulación y variables que la describen (Pulido-Calvo et al., 2006).

El V_T (en m^3) viene dado por su descomposición geométrica como (ecuación 3.1):

$$V_T = L^2 (H1 + H2 + F) + 2L N2 (H1 + H2 + F)^2 + 1,33 N2^2 (H1 + H2 + F)^3 \quad (3.1)$$

donde L la longitud (m) del lado de la base de la balsa, $H1$ la profundidad (m) de la excavación a partir de la superficie original del terreno, $H2$ la diferencia (m) entre la altura del agua y la profundidad de la excavación ($H1$), F el resguardo o diferencia (m) entre la altura de la balsa y la del agua, y $N2$ la pendiente interior (Figura 3.8).

El coste de excavación de la balsa es proporcional al volumen excavado VX (m^3), el cual se calcula como:

$$VX = L^2 H1 + 2 L N2 H1^2 + 1,33 N^2 H1^3 \quad (3.2)$$

Como es deseable minimizar el coste de excavación, el VX fue igual al volumen aportado para construir los terraplenes VL (m^3), considerando un coeficiente para compensar la diferencia de volumen en el movimiento de tierra debido al menor nivel de compactación del volumen de relleno en los movimientos de tierra (CF):

$$VL = 4[L + N2(H1 + H2 + Fr) + Ta + N1(H2 + Fr)] [0,5(N1 + N2)(H2 + Fr)^2 + Ta(H2 + Fr)] \quad (3.3)$$

$$VL = VX (1 + CF) \quad (3.4)$$

donde $N1$ es la pendiente del talud exterior de la balsa y Ta la anchura (m) del pasillo de coronación.

El coste de impermeabilización es proporcional a la superficie a impermeabilizar SI (m^2):

$$SI = L^2 + 4 \{ [L + (H1 + H2 + Fr) N2] (H1 + H2 + Fr) \sqrt{1 + N2^2} \} \quad (3.5)$$

La superficie de terreno ST (m^2) ocupado por la balsa se calcula como:

$$ST = [2 (H1 + H2 + Fr) N2 + L + 2Ta + 2 (H2 + Fr) N1]^2 \quad (3.6)$$

Para poder establecer las dimensiones geométricas (L , $H1$ y $H2$) que hagan mínimo el coste de inversión de la balsa semienterrada para un volumen de regulación conocido, se fijaron los valores de $N1$; $N2$; Ta ; F ; y CF , que dependen de métodos y técnicas locales de construcción (Edwards et al., 1992; Amigó y Aguiar, 1994 y CNEGP, 2010). Las alturas del agua contenida en el depósito ($H1 + H2$) se consideraron en el rango de 2 a 12 m (Giscosa, 1995), como márgenes de seguridad para evitar excesos de presión sobre el fondo y los taludes laterales, y en consecuencia los riesgos de hundimiento del terreno y de rotura por sobretensión de la membrana impermeabilizante.

3.4.3. Determinación de las necesidades netas mensuales de agua de los cultivos.

Las necesidades netas mensuales de agua de riego de los cultivos (en mm), por los cultivos seleccionados (maíz y viña) expresada en el apartado 3.3, se obtienen como (ecuación 3.7):

$$N_{n(t)} = ETc_{(t)} - PE_{(t)} + Alm_{(1-t)} + Ld_{(t)} \quad (3.7)$$

donde N_n la cantidad neta de agua de riego, ETc la evapotranspiración del cultivo, PE la precipitación efectiva, Alm almacenamiento de agua del suelo, Ld altura de lámina de agua necesaria para el control de sales, (t) periodo de tiempo en el cual se hace el cálculo.

Para el prediseño de sistemas de riego no es necesaria una alta precisión de las necesidades de agua de los cultivos, y la mayoría de los datos reportados fueron con mediciones mensuales por lo que se estimó la demanda de agua media mensual (**Figura 3.9**) a lo largo de la campaña de riego con la metodología de Penman Montith (Allen et al., 2006) con datos de clima y cultivos obtenidos del Servicio Integral de Asesoramiento al Regante (SIAR) de Castilla La Mancha quienes consideran los datos generales de coeficiente de los cultivos (K_c) con más de 20 años de experiencia de medición (con lisímetros, según el balance hídrico o por métodos

micrometeorológicos) en los cultivos de la zona (SIAR, 2015). A partir de dichos valores se estimó la demanda de agua diaria de los sistemas de riego en estudio, y con un análisis más detallado para el caso de redes colectivas de riego a la demanda se estimó la demanda de caudal y presión en el origen de la red a partir del método de las curvas aleatoria de demanda diaria (*RDDC*) propuesto por Moreno et al., 2007b (**apartado 3.4.3.2**).

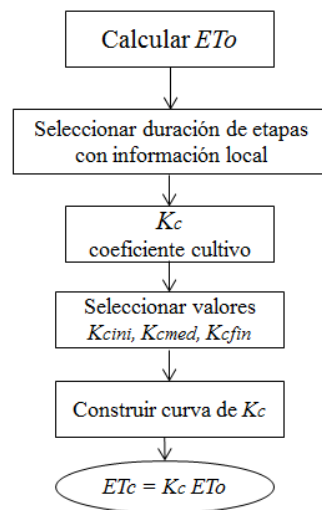


Figura 3.9. Procedimiento general para calcular evapotranspiración del cultivo (ET_c).

La distribución de la demanda media mensual para un cultivo de maíz en Albacete y para la alternativa de cultivo en sistema de riego en “La Grajuela” (81% de viñedo y 19% de olivar) se muestra en la Tabla 3.2. En los modelos DOPW, DEPIRE, y en la primera etapa del modelo DRODN la demanda media diaria de agua se obtuvo según se recoge en la metodología de la demanda media diaria de agua (L_m) (**apartado 3.5.2.1**). En la segunda etapa el modelo DRODN, para estimar la distribución de la demanda de agua en el periodo punta de la alternativa de cultivos, se utiliza la metodología de las curvas aleatorias de demanda diaria (*RDDC*) (**apartado 3.5.4.1**).

Tabla 3.2. Necesidades de agua mensuales en Castilla la Mancha para cultivo de maíz ($N_{n(m)}$) de ciclo largo sembrado en Albacete y la alternativa de cultivo ($N_{n(R)}$) (con 81% de viñedo y 19% de olivar) en la red colectiva de riego a la demanda de “La Grajuela”.

Necesidades de agua	Meses						Total (mm año ⁻¹)
	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	
$N_{n(m)}$ (mm)	34,0	61,0	166,0	236,0	193,0	10,0	700,0
$N_{n(R)}$ (mm)	-	19,7	38,3	65,0	49,9	3,1	176,0

La Figura 3.10 muestra un ejemplo de cálculo de caudales en periodo punta con la metodología de L_m y con la de $RDDC$ para la red de riego “La Grajuela” considerando intervalos de 15 min para la posible apertura aleatoria de los hidrantes, con un tiempo de operación $OT = 18$ h.

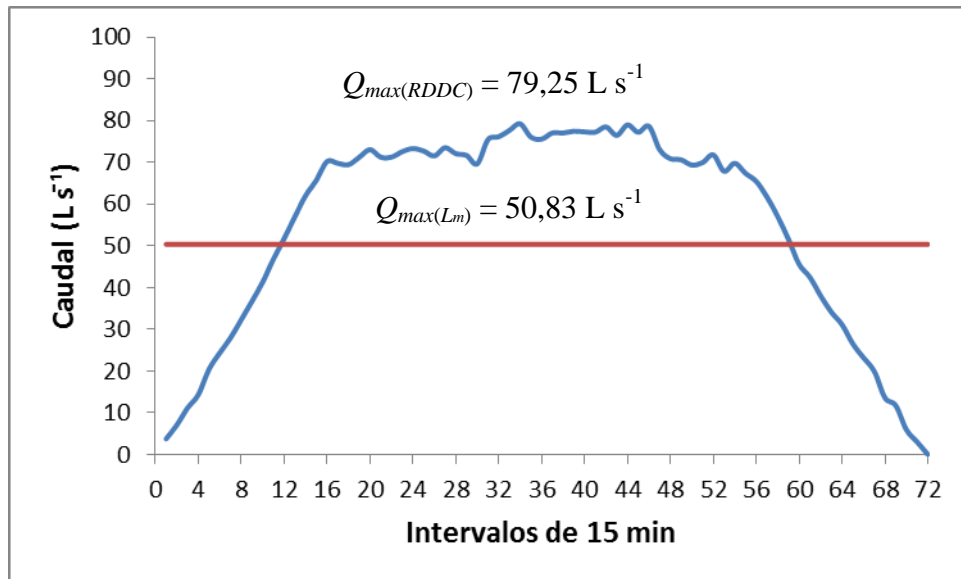


Figura 3.10 Curvas de máximo caudal para obtener el Q_{max} con metodología L_m y $RDDC$.

3.4.4. Volumen y balance de agua en la balsa.

Para determinar el volumen de agua de la balsa se consideran los volúmenes demandados y los volúmenes disponibles en el sondeo a lo largo del periodo de análisis cuyo volumen útil mínimo será la demanda de agua para un día de máxima demanda y cuyo valor máximo estará en función de la disponibilidad de agua en el sondeo para cubrir las demandas de agua del sistema de riego. En este caso el método usado acumula el resultado de oferta demanda de agua en cada día de la campaña de riego y el volumen de la balsa será la diferencia entre la demanda acumulada y la oferta acumulada la cual nunca será inferior al volumen de agua requerido en el día de máxima demanda.

El procedimiento de cálculo de balance de agua en la balsa con los modelos DEPIRE Y DRODN (ecuación 3.8) se hace un balance de masa, considerando que no hay pérdidas por percolación, ni rebosamiento y que los aportes de precipitación son despreciables en las condiciones climáticas donde se desarrolla la investigación. Por tanto la ecuación de balance de agua para estimar el volumen de agua (m^3) en cada periodo de tiempo considerado es:

$$V_{u(t)} = V_{u(t-1)} + V_{P(t)} - Ev_{(t)} - Dem_{(t)} \quad (3.8)$$

donde V_u = volumen útil de agua contenida en la balsa; V_P = volumen de agua bombeado del sondeo a la balsa; Ev = volumen de pérdidas de agua por evaporación desde la superficie libre de agua de la balsa; Dem = volumen demandado de agua del sistema de riego; el subíndice (t) , es el periodo de tiempo en el cual se hace el balance, el cual es diario para el modelo DEPIRE y cada 15 min con el modelo DRODN.

El conjunto de supuestos y restricciones a que se ve sometido el V_u de la balsa son las siguientes:

- El V_u en la balsa debe mantenerse dentro de unos límites de seguridad definidos por un volumen mínimo V_{min} y otro máximo V_{max} durante el periodo de funcionamiento (t):

$$V_{min} \leq V_u \leq V_{max} \quad \forall t \quad (3.9)$$

- Debe verificarse el balance de volúmenes en la balsa:

$$V_{u(t)} - V_{u(t-1)} = V_{P(t)} - Ev_{(t)} - Dem_{(t)} \quad \forall t \quad (3.10)$$

- En el rebombeo (Q_{rb}) al equipo pívot o a la red riego debe cumplirse:

$$Q_{rb (t)} = Dem_{(t)} \quad \forall t \quad (3.11)$$

- La demanda total del sistema de riego planteado debe ser satisfecha en:

$$\sum_{i=1}^M d_{i(t)} = Dem_{(t)} \quad \forall t \quad (3.12)$$

donde d_i la demanda en cada instante de los M nudos del sistema de riego.

- Los volúmenes almacenados en la balsa al final del periodo de consumo punta (10 días en nuestro caso) considerado como intervalo de optimización (NE) deben coincidir con los volúmenes iniciales (0), por lo que el volumen total aportado al sistema a lo largo del intervalo de optimización debe ser igual al demandado:

$$V_u(NE) = V_u(0) \quad (3.13)$$

$$\sum_{t=1}^{NE} Q_{rb(t)} = \sum_{t=1}^{NE} Dem_{(t)} \quad \forall t \quad (3.14)$$

- El caudal bombeado, la presión suministrada y el rendimiento del bombeo es función de las características de la bomba y del plan de operación planteado.

3.4.5. Optimización de curvas características de bomba.

Para seleccionar las bombas óptimas que minimizar los costes de transporte de agua desde la fuente hasta el punto de alimentación de los sistemas de riego hay que tener en cuenta la forma de las curvas características caudal-altura manométrica ($Q-H$) y caudal-rendimiento ($Q-\eta$) así como el diámetro óptimo de las tuberías de impulsión y distribución. Estas variables determinan la eficiencia energética del sistema durante la campaña de riego y permiten su ajuste a las condiciones variables del acuífero (Moreno et al., 2009).

Siguiendo a Moreno et al. (2009), las curvas características ($Q-H$ y $Q-\eta$) de las bombas se pueden aproximar por las **ecuaciones (3.15 y 3.16)** como sigue:

$$H = a + bQ + cQ^2 \quad (3.15)$$

$$\eta = eQ + fQ^2 \quad (3.16)$$

donde los coeficientes a , b , c , e y f ; determinan las formas de las curvas. A fin de evitar dos posibles puntos de funcionamiento de la bomba cuando se resuelva el sistema de ecuaciones Jeppson (1977) propone unos cambios de variables para eliminar el coeficiente b de la **ecuación 3.15**;

$$Q = Q + \frac{b}{2c} \quad (3.17)$$

Con las **ecuaciones 3.15 y 3.17** la curva característica de la bomba es la siguiente:

$$H = a' + cQ'^2 \quad (3.18)$$

y el coeficiente a' es

$$a' = a - \frac{b^2}{4c} \quad (3.19)$$

La Figura 3.11 muestra el efecto de este cambio de variable que permite eliminar el coeficiente “*b*”.

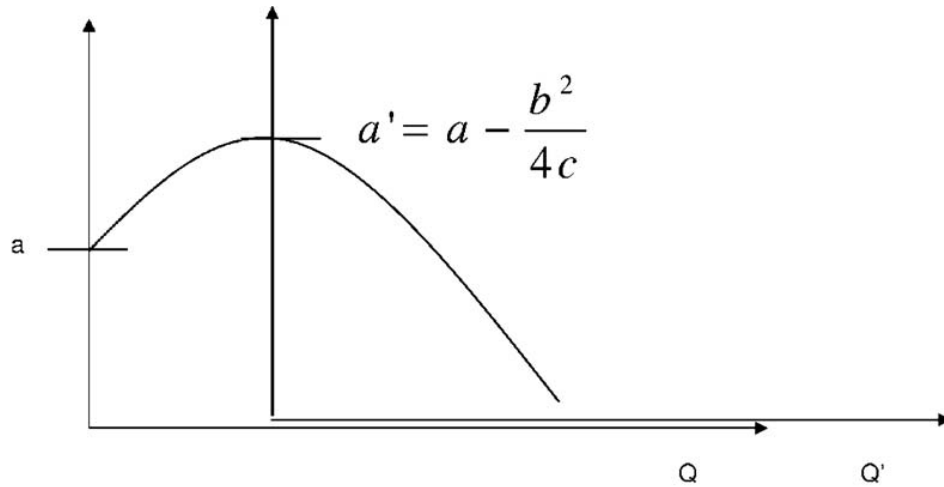


Figura 3.11. Esquema del cambio de variable en la curva Q-H de una bomba.

Los coeficientes *e* y *f* pueden ser escritos en función de los coeficientes *a* y *c*.

La Figura 3.12 muestra la relación entre la altura y la curva de eficiencia. El punto de funcionamiento (Q_b , H_d) es definido por la intersección de la curva característica de la bomba y la curva de demanda del sistema. Lamaddalena y Sagardoy (2000) y Calejo et al. (2008) muestran la metodología para obtener la curva características en las redes de distribución. La altura de bombeo (*H*) del sistema de distribución dependerá del desnivel geométrico a vencer (H_g) y las pérdidas de carga (hQ^2) en las tuberías, (**ecuación 3.20**):

$$H = H_g + hQ^2 \tag{3.20}$$

Cuando se selecciona una bomba comercial la intersección de la curva característica de la bomba y la curva de demanda del sistema puede quedar por

encima del punto de funcionamiento necesario (Q_d, H_d) , causando un consumo de energía innecesario si no se selecciona adecuadamente la bomba.

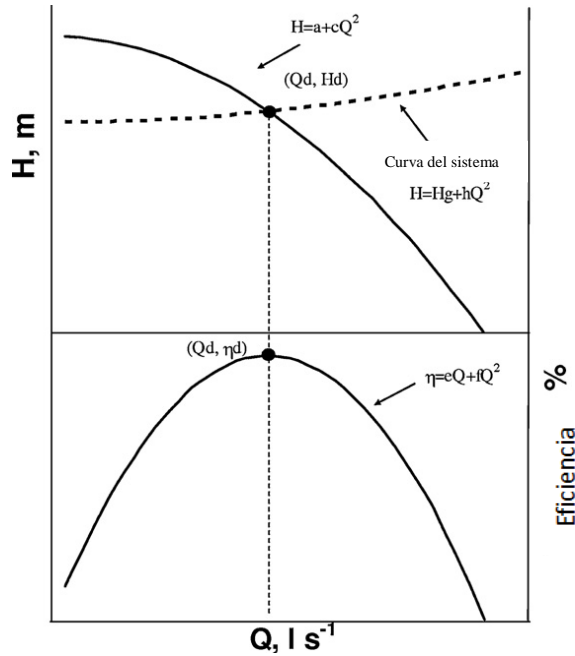


Figura 3.12. Esquema de las curvas características de una bomba (Moreno et al., 2007a).

Cuando H y η son iguales a cero (0) (Figura 3.12) y considerando las ecuaciones 3.15 y 3.16 con $b = 0$, se tendrá

$$eQ_{max} = -fQ_{max}^2 \quad (3.21)$$

entonces el coeficiente “ e ” es definido como sigue

$$e = -f \left(-\frac{a}{c} \right)^{0,5} \quad (3.22)$$

además la relación entre el coeficiente “ f ” y los coeficientes a y c puede ser obtenida considerando la máxima eficiencia como sigue:

$$\frac{d\eta}{dQ} = 2fQ + e = 0 \tag{3.23}$$

$$Q = -\frac{e}{2f} \tag{3.24}$$

con las **ecuaciones 3.16 y 3.24** la siguiente ecuación puede ser obtenida

$$\eta_{\max} = f\left(-\frac{e}{2f}\right)^2 + e\left(-\frac{e}{2f}\right) = -\frac{e^2}{4f} \tag{3.25}$$

considerando la ecuación **3.22 y 3.25** se obtiene

$$f = \frac{(4\eta_{\max})}{\left(\frac{a}{c}\right)} \tag{3.26}$$

a partir de la **ecuación 3.15**, con $b = 0$, la siguiente relación puede ser establecida

$$a = H_d - cQ_d^2 \tag{3.27}$$

El rendimiento máximo de la bomba se puede obtener de la información suministrada por el fabricante (normalmente en torno al 80%)

Con las curvas características de forma optimizada en función del coeficiente c que cumplen las relaciones anteriores se pueden buscar las curvas características de las bombas existentes en el mercado que mejor se adapten a las pretendidas.

3.4.6. Cálculos de potencia de bomba y pérdidas de carga.

La potencia absorbida (N_p , en kW) en bombeo y rebombeo para las condiciones de funcionamiento de cada mes de la campaña de riego, fueron calculadas con la presión (H_T , en m) y el caudal (Q , en $m^3 s^{-1}$), necesarios para el adecuado funcionamiento de la(s) bomba(s) del sistema mediante la ecuación (3.28).

$$N_p = \frac{9,81 Q H_T}{\eta} \quad (3.28)$$

donde $\eta =$ es el rendimiento del sistema de bombeo (decimal). En el modelo fue considerada como máxima eficiencia en el bombeo de 80%.

Las presiones de bombeo en sondeo para impulsar agua a la balsa (H_{Ts}) y para el rebombeo al pivot (H_{Tp}) (modelos DOPW y DEPIRE) fueron calculadas usando las ecuaciones (3.29) y (3.30). Para el rebombeo a la red de riego (H_R) el valor requerido en cabecera fue 45 m (modelo DRODN).

$$H_{Ts} = 1.1(h_{ris} + h_{rds}) + ND + \Delta Z_s \quad (3.29)$$

$$H_{Tp} = H_e + 1.1(h_{rdp} + h_{rp}) + H_{asp} + \Delta Z_p \quad (3.30)$$

donde h_{ris} = pérdida de carga por fricción en la tubería (acero) de impulsión (m) del sondeo, h_{rds} = pérdida de carga por fricción en la tubería (PVC) de distribución (m) a la balsa, ND = nivel dinámico en el sondeo (m), ΔZ_s = diferencia de elevación entre la boca del sondeo y la balsa (5 m, en el caso de estudio), H_e = presión de operación del aspersor del pivot (12 m en caso de estudio), H_{asp} = altura del aspersor sobre el suelo (2,5 m en caso de estudio), h_{rdp} = pérdida de carga por fricción en la tubería (PVC) de distribución desde la balsa al pivot (m), h_{rp} = pérdida de carga por fricción en la tubería lateral del pivot (m); ΔZ_p = diferencia de elevación en el pivot (0 m en caso de estudio). Las pérdidas de carga singulares se estimaron como un 10% de las de fricción.

En caso de necesidades de presión en bombeo directo al pivot desde el sondeo a H_{Ts} habría que sumarle H_{Tp} , y no considerar ΔZ_s .

Las pérdidas de carga por fricción en las tuberías (h_r) de impulsión (de acero) y distribución (de PVC) fueron calculadas con la ecuación (3.31) de Hazen-Williams y Veronesse-Datei (3.32) respectivamente.

$$h_{ri} = 10,62 * \left(\frac{Q}{C} \right)^{1,852} * D_i^{-4,87} * L_i \quad (3.31)$$

$$h_{rd} = 9,2 * 10^{-4} * (Q^{1,8} * D_d^{-4,8}) * L_d \quad (3.32)$$

donde L_i = longitud de tubería de impulsión (m) ($L_i = ND+20$ m para la tubería impulsión en sondeo y $L_i = 20$ m en balsa); L_d = longitud de la tubería de distribución (m) ($L_d = 50$ m para la tubería de distribución desde balsa, $L_d = 1,1 * R$ para la tubería de distribución al pivot, donde R = radio del pivot y $L_d = 100$ m para la tubería de distribución a la red); C = coeficiente de fricción ($C = 140$ para acero (Roy, 1988)); Q = Caudal ($m^3 s^{-1}$) optimizado, D_i = diámetro interno de tubería de impulsión (m), D_d = diámetro interno de tubería de distribución (m).

El cálculo de la pérdida de carga por fricción en la tubería lateral del pivot (h_{rp}) se realizó con la ecuación (3.33) de Hazen-Williams modificada (Keller y Bliesner, 1990)

$$h_{rp} = 0,548 * h_{ro} = 0,548 * \left(10,646 * \left(\frac{Q_p}{C'} \right)^{1,852} * D_p^{-4,87} * R \right) \quad (3.33)$$

donde: D_p = diámetro interno de la tubería del pivot (m); R = radio efectivamente mojado por la máquina (m); Q_p = caudal en la cabecera del pivot ($m^3 s^{-1}$); C' = coeficiente de fricción ($C' = 128$ (Moreno et al., 2012)).

3.4.7. Cálculos económicos.

3.4.7.1. Anualidad de la inversión.

La anualidad de la inversión ($A = CRF.C_i$, en € año⁻¹) correspondiente a los costes de inversión (C_i , en €) se calculó considerando la vida útil (n en años) de 12 años para bombas y tubería del pivot y 24 años para el resto de equipos, tubería y accesorios (Scherer y Weigel, 1993), una tasa de interés (i de 6%). El factor de

recuperación del capital (*CRF*) y la anualidad de la inversión por unidad de superficie (C_a , en € ha⁻¹ año⁻¹) fueron calculados mediante las ecuaciones (3.34) y (3.35).

$$CRF = \frac{i (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (3.34)$$

$$C_a = \frac{A}{S} = \frac{CRF \cdot C_i}{S} \quad (3.35)$$

donde *S* es el área regada por el sistema de riego (ha).

Para considerar la posibilidad de que los precios de la energía puedan cambiar debido al índice de inflación, ha sido implementada en el desarrollo de los modelos ecuación (3.36) de Keller y Bliesner (1990). De esta manera se ha considerado un análisis de sensibilidad para tener en cuenta el efecto del aumento del precio de la energía y el índice general de inflación.

$$EAE = \left[\frac{(1+e)^n - (1+i)^n}{(1+e) - (1+i)} \right] x \left[\frac{i}{(1+i)^n - 1} \right] \quad (3.36)$$

donde *e* = tasa anual de incremento de costes de energía de 6%.

Para el cálculo de anualidad de la inversión se consideraron los precios medios de diferentes fabricantes y distribuidores en España (Tabla 3.3).

3.4.7.2. Costes del sondeo.

Incluye los costes de elaboración de proyecto (1 000 €), transporte (500 €) y costes de perforación (60 € m⁻¹). Se considera que la profundidad de perforación es 1,5 veces la profundidad del *ND* en el sondeo. Los coeficientes de determinación de las curvas de regresión de costes de los diferentes elemento, en función de la potencia (*Np*) o del diámetro (*D*) (Tabla 3.3) fueron mayores de 0,94 y altamente significativos (Carrion et al., 2013). Otros costes complementarios considerados han sido: a)

programador y dispositivos auxiliares (800 € ud⁻¹); b) línea eléctrica (6 000 € km⁻¹) y c) montaje y transporte (950 €).

Tabla 3.3. Ecuaciones de costes de bombas, tuberías y accesorios obtenidos a partir de costes de mercados de empresas distribuidoras.

COSTES (€)	ECUACIÓN
Grupo motor-bomba	$C_p = 0,0016N_p^3 + 0,924N_p^2 + 268,28N_p$
Tuberías de impulsión en sondeo (acero)	$C_{pi} = 0,1007D_i^{1,0853}$
Tuberías de distribución (PVC 0,6 MPa)	$C_{pd} = 0,001D_d^{1,8459}$
Tubería del equipo pivót (acero)	$C_{pp} = 0,7198D_p^{0,969}$
Coste del equipo pivót excepto la tubería	$C_{tr} = 15,34D_p + 45,60St + 398,64$
Cableado de alimentación de bombas y equipo pivót	$C_c = 0,002532 N_p^2 + 0,08233 N_p + 5,7296$
Cuadro eléctrico	$C_{ce} = 224,42 N_p^{0,3291}$
Arrancador electrónico	$C_a = -0,024 N_p^2 + 25,42 N_p + 708,16$
Transformador	$C_t = 0,0121P_t^2 + 9,6994 P_t + 4051,88$
Válvula hidráulica	$C_v = 0,0174 D_i^2 + 0,0105 D_i - 26,65$

N_p = potencia de bomba (kW); D = diámetros de tuberías (mm) St = separación entre torres (m); P_t = potencia del transformador (kVA).

3.4.7.3. Coste de la balsa.

Los elementos que conforman el coste de la balsa son: el movimiento de tierra - excavación y compactación, la superficie de impermeabilización y el coste de oportunidad que supone dejar de percibir el beneficio derivado del uso de la superficie de terreno ocupado (Edwards et al., 1992); siendo $3,31 \text{ € m}^{-3}$; $5,65 \text{ € m}^{-2}$ y $0,0309 \text{ € m}^{-2} \text{ año}^{-1}$, respectivamente.

3.4.7.4. Coste del equipo pívot.

Se utilizó un lateral de pívot con diámetro de tubería constante y separación entre torres según recomendaciones de Montero et al. (2012) considerando los diámetros comúnmente usados (diámetro externo): 114,3 mm (4½"); 127 mm (5"); 152,4 mm (6"); 168,3 mm (6 5/8"); 203,2 mm (8"); 219,1 mm (8 5/8"); 254 mm (10"). El espesor de las tuberías fue, 2,4; 2,6; 2,8; 3,2; 3,4; 3,6 y 4,0 mm respectivamente. Los costes de algunos componentes adicionales del pívot fueron: a) bajantes con contrapesos y regulador de presión (19 y 16 € ud⁻¹); b) el aspersor usado fue modelo Spray (3 € ud⁻¹), con una separación entre aspersores 2,88 m; c) coste de, transporte y ensamblaje (780 € tramo⁻¹); d) equipos adicionales (panel de control, sistema de alineamientos y seguridad, base de hormigón, ruedas alta flotación, etc.) (5 500 €); e) coste del alero 75 € m^{-1} con diámetro de 6 5/8"; f) la instalación en rebombeo, consistente en: programador y dispositivos auxiliares (800 € ud⁻¹), caseta de bombeo (3 850 € ud⁻¹), montaje y transporte (1 250 €).

3.4.7.5. Costes de operación.

El precio de la energía varía en los distintos periodos tarifario durante el día y en los diferentes meses del año. Así, con caudales pequeños pueden aumentar los costes energéticos si se necesita tener que bombear durante periodo tarifarios más caros, mientras que con caudales grandes pueden utilizarse solo periodos tarifarios

baratos, pero requiere mayor inversión en bomba y tuberías. La presencia de la balsa de almacenamiento y regulación permite aprovechar los periodos tarifarios más baratos, pero se incrementan los costes de inversión.

Los costes operacionales anuales (C_{op} , € año⁻¹) por unidad de área regada (C_e , € ha⁻¹ año⁻¹) se calcularon dividiendo los C_{op} por el área regada (S , en ha), siendo C_{op} la suma de los costes de acceso a la potencia y el consumo energético. Los C_{op} en el caso de los modelos que incluyen balsa son la suma de los costes anuales en el sondeo y en la inyección de agua al equipo pívot o a la red colectiva de riego. En cada caso fueron calculados con las ecuaciones 3.37 y 3.38.

$$C_{op} = \text{Acceso a potencia} + \text{Consumo energético} \quad (3.37)$$

$$C_{op} = \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^k (N_p)_i Pa_{ij} + \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^k (N_p)_i T_{ij} P_{ij} \quad (3.38)$$

donde N_p = potencia de la bomba calculada a partir de la ecuación (3.28) en kW; T = tiempo de operación mensual de la bomba en horas; Pa = precio de acceso a la potencia (€ kW⁻¹ mes⁻¹); P = precio de la energía en € kW⁻¹ h⁻¹; los índices i y j se refiere a los meses y precio de la energía en las horas (k) durante el día, respectivamente.

Los cálculos de costes de funcionamiento están basados en los precios de la energía en España de 2012, y las horas disponibles en cada periodo descritos en la Tabla 3.4. La distribución de horas de alto ($P1$), medio ($P2$) y bajos ($P3$) precios de la energía puede ser simplificado en tres periodos: Los periodos tarifarios de bajo coste, que corresponden a 8 h día⁻¹ (de 00:00 a 8:00), 10 h día⁻¹ para periodos de coste medio (de 8:00 a 10:00 y de 16:00 – 24:00) y 6 h día⁻¹ para periodos de alto coste (10:00 – 16:00). Los costes de la energía están detallados en la Tabla 3.5.

Tabla 3.4. Número de horas disponibles en cada periodo de coste energético para cada mes del año.

Periodos energéticos	MESES											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Alto (P1)	186	168	186	180	186	180	186	186	180	186	180	186
Medio (P2)	310	280	310	300	310	300	310	310	300	310	300	310
Bajo (P3)	248	224	248	240	248	240	248	248	240	248	240	248

Tabla 3.5. Costes por acceso a la potencia y por consumo de energía eléctrica.

Periodos energéticos	Acceso a potencia (<i>Pa</i>)	Energía (<i>P</i>)
	(€ kW ⁻¹ año ⁻¹)	(€ kWh ⁻¹)
Alto (P1)	23,54	0,1392
Medio (P2)	14,52	0,1232
Bajo (P3)	3,33	0,0867

Adicionalmente fueron considerados un impuesto anual a la electricidad 9,86% y costes de equipos de medición de 30 € año⁻¹.

Adicionalmente, como un gasto de mantenimiento, se ha considerado un 5% de la anualidad de la inversión para que el sistema planteado cumpla con su vida útil (n) de 12 años para bombas y tubería del pivot y 24 años para el resto de equipos, tubería y accesorios (Scherer y Weigel, 1993).

3.4.8. Funcionamiento del equipo pivot.

Uno de los principales problemas en el diseño y manejo de equipos pivots es la escorrentía en el extremo de la máquina. Para evitar este inconveniente debe ser

determinada la mínima velocidad de desplazamiento para evitar escorrentía dependiendo del tipo de aspersor y la anchura mojada que genera (Keller y Bliesner, 1990; Allen, 1991; Allen et al., 2000). En los modelos desarrollados (DOPW y DEPIRE) el bombeo se optimiza conjuntamente con el equipo pívot para minimizar los C_T . Para ello, la pluviometría máxima del pívot (P_{mR}) se calculó usando la ecuación 3.39, asumiendo un patrón de aplicación de forma elíptica (Keller y Bliesner, 1990; Allen, 1991; Tarjuelo, 2005).

$$P_{mR} = \frac{28\ 000\ Q_s}{\pi\ R\ W_R} \quad (3.39)$$

donde P_{mR} = pluviometría máxima en el extremo (mm h^{-1}); R = radio efectivamente regado (m); W_R = anchura mojada por los aspersores en el extremo de la máquina (m); $Q_s = Q_p * Pe$ caudal que llega al suelo; Q_p caudal descargado por el equipo pívot; Pe , proporción de agua descargada por el equipo que llega al suelo.

Allen (1991) parte de la ecuación de Kostiakov (ecuación 3.40) para estimar la infiltración de agua en el suelo, y establece dos igualdades (ecuaciones 3.41 y 3.42), que se deben resolver mediante un proceso iterativo para determina la pluviometría máxima (P_m) que es capaz de soportar el suelo sin presentar problemas de escorrentía (Figura 3.13).

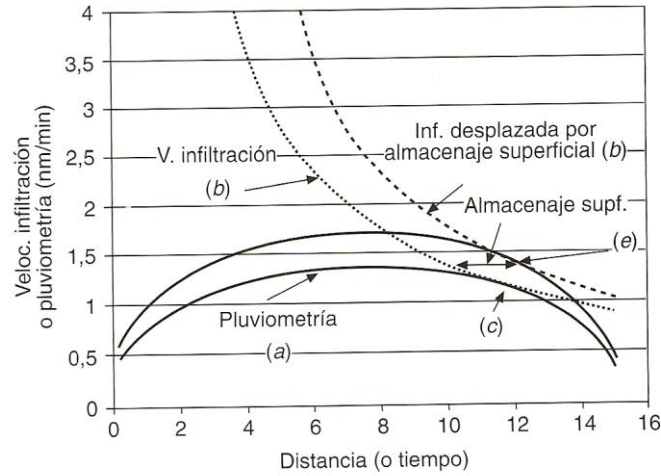


Figura 3.13. Esquema de las curvas de infiltración y pluviometría en un equipo pivó.

$$i = K \cdot t^n \quad (3.40)$$

$$P_m = \frac{(1 - SR \frac{P_m}{K})(D_o - AS)^{n/(n+1)} (n+1)^{n/(n+1)} K^{1/(n+1)}}{[1.05 - 1.6(\pi/2)^2 (D_o / D_{ba} - 0.5)^2]^{1/2}} \quad (3.41)$$

$$D_o = \left(\frac{[1.05P_m^2 - 1.6P_m^2(\pi/2)^2(D_o/D_{ba} - 0.5)^2]^{-1/2} [-1.6P_m^2(\pi/2)^2(D_o/D_{ba} - 0.5)/D_{ba}]}{\left(1 - SR \frac{P_m}{K}\right) K^{n+1} (n+1)^{-1/(n+1)} n} \right)^{-(n+1)} + AS \quad (3.42)$$

siendo: i , la velocidad de infiltración (mm min^{-1}); K y n los coeficientes experimentales de ajuste de la ecuación de infiltración; t es el tiempo transcurrido desde que comienza la aplicación de agua en un punto (min); P_m , pluviometría máxima en el extremo de la máquina (mm min^{-1}); SR , el factor de sellado (que toma los valores 0,36 para suelo recién labrado, 0,20 para terreno labrado hace tiempo y 0,16 para rastrojo de alfalfa); D_o la altura de lámina de agua aplicad al terreno en un tiempo t (mm); AS la capacidad de almacenamiento superficial del suelo, que puede

llegar hasta 8 mm; D_{ba} la altura total de agua aplicada sobre la superficie del suelo al pasar la máquina para dar un riego (mm);

Keller y Bliesner (1990) recomiendan la ecuación (3.43) para estimar la capacidad de almacenamiento superficial SS (en mm):

$$SS = SS_m + k_d SS_d + SS_f \quad (3.43)$$

donde SS_m = capacidad de almacenamiento de las micro-depresiones (mm), SS_d = capacidad de almacenamiento de las pequeñas depresiones (mm), SS_f = almacenamiento en el follaje de las plantas (mm) y $k_d = 0,5$ para suelo surcado y 1,0 para suelo liso.

Los valores de SS_d se pueden estimar usando la ecuación (3.44):

$$SS_d = \frac{(6 - s)(12 - s)^2}{144} \quad (3.44)$$

donde s = pendiente del terreno (%) (para $s \leq 6\%$).

Los valores de SS_m dependen de las micro-características de la superficie del suelo y no dependen de la pendiente. El almacenamiento en el follaje SS_f , es función de la densidad de la vegetación, estructura y tamaño de las hojas. En la Tabla 3.6 se muestran valores generales de SS_m y SS_f .

Tabla 3.6. Valores generales de almacenamiento de agua en el follaje (SS_f) y micro depresiones (SS_m).

Tipos de cultivos o cobertura	$SS_f + SS_m$
Suelo desnudo	1
Suelos labrados recientemente	2 – 3
Hiervas y pastos de cobertura	3
Cultivos para segar (alfalfa, granos)	2
Cultivos en hilera de porte bajo	2
Cultivos en hilera de porte alto (maíz)	3

Para calcular el tiempo máximo de paso de la maquina sobre un punto del terreno en el extremo (T_{PP} , en min) para evitar escorrentía se usa la ecuación 3.45, asumiendo un patrón de aplicación de agua de forma semi-elíptica.

$$T_{PP} = \frac{4D_{ba}}{\pi P_m} \quad (3.45)$$

donde P_m = pluviometría máxima en el extremo de la máquina (mm min^{-1}), y D_{ba} = dosis bruta aplicada que alcanza el suelo (mm).

La velocidad mínima del pivot (V_m) para evitar escorrentía es calculada con la ecuación (3.46):

$$V_m = \frac{2\pi L_t N_{n\max}}{60 E D a D_{ba} O T} \quad (3.46)$$

donde L_t = distancia del punto pivote a la última torre, $N_{n\max}$ necesidades netas de agua del cultivo en periodo punta (mm día^{-1}), $E D a$ = eficiencia de distribución del agua de riego (Keller y Bliesner, 1990), $O T$ = tiempo disponible para regar al día (h día^{-1}).

La anchura mojada mínima al en el extremo del pivot (W_R) para evitar escorrentía viene calculado con la ecuación (3.47):

$$W_R = T_{PP} V_m \quad (3.47)$$

3.4.9. Datos topográficos y de las instalaciones.

Para cada caso de estudio se consideró: un desnivel y separación entre sondeo y balsa de 5 m y 50 m respectivamente; una profundidad del sondeo 1,5 veces el nivel dinámico (ND); la bomba se situó 20 m por debajo del ND . Se consideró un ND constante a lo largo de la campaña de riego y despreciable la variación del nivel de

agua en la balsa a lo largo de la campaña de riego. La línea eléctrica se calculó con el supuesto de necesitar 1,0 km de línea de baja tensión hasta llegar al sondeo. En el modelo DOPW y DEPIRE no hay diferencia de elevación topográfica en los escenarios de estudio planteados.

3.4.10. Otros datos

Otros costes asociados con el funcionamiento de los modelos fueron:

1. Los valores de los parámetros de entrada para diseño de la balsa considerados han sido: $N1 = 1,5$; $N2 = 2$; $Ta = 5$ m; $F = 1$ m; y $CF = 10$ %.
2. En el modelo DOPW y DEPIRE la eficiencia de aplicación (E_a) se obtuvo a partir de la ecuación de Keller y Bliesner (1990) resultando $E_a = 80,3\%$, que se corresponde con eficiencia de distribución de agua $EDa = 87,3$ % (Ortiz et al., 2010), para un coeficiente de uniformidad del agua en el suelo $CU = 88\%$, una proporción de área bien regado $a = 80\%$ y una proporción del agua descargada por el pívot que llega al suelo $Pe = 92,0$ %; sin pérdidas en la red distribución de agua (Ortiz et al., 2009).
3. En modelo DRODN para red de riego a la demanda se consideró $E_a = 88\%$ (Carrión et al., 2013).
4. Las pérdidas de agua por evaporación en la balsa $E_b = 7\%$ del agua almacenada (Molina, 2004).
5. El tiempo máximo de riego (18 h)
6. Intervalo de riego para el equipo pívot fue de 1 día.
7. El tipo de suelo fue de textura media

8. El factor de sellado del suelo 0,20 (labrado hace tiempo)

3.5. CONSIDERACIONES ESPECÍFICAS DE LOS MODELOS.

3.5.1. Función objetivo a optimizar en los modelos.

Los modelos de optimización (DOPW, DEPIRE y DRODN) buscan minimizar el coste anual total de aplicación o entrega de agua de riego (según corresponda) por unidad de área regada (ecuación 3.48):

$$\text{MIN } C_T = C_a + C_e + C_m \quad (3.48)$$

donde C_a = coste anual de inversión (sondeo, línea eléctrica, bombas, tuberías, y costes varios), y coste anuales de operación, el cual incluye los costes energéticos (C_e) y = coste anual de mantenimiento (C_m).

Los modelos están basados en la relación entre la curva característica (H-Q) y curva de rendimiento del sistema de bombeo (η -Q) (apartado 3.4.5) y usando el algoritmo propuesto por Moreno et al. (2009) para obtener el tipo de curva característica y de eficiencia deseable considerando la relación teórica entre las dos curvas para una bomba específica como una función del coeficiente c . Por tanto durante el proceso de optimización se obtienen el valor del coeficiente c , diámetro de tubería (D) y caudal (Q), para calcular después la potencia de la bomba y los costes de inversión y energéticos correspondientes. El resto de las variables a optimizar son subrutinas de cálculo complementario que determinan los costes de inversión y de energía. En los modelos se ajustaron los diámetros óptimos de las tuberías (de mínimo C_T) a los diámetros comerciales existentes en el mercado teniendo en cuenta los límites mínimos y máximos de velocidad (0,5 y 3 m s⁻¹) y presiones admisibles según material y timbraje (Pulido-Calvo et al., 2008).

El método tradicional de optimización para minimizar una función de n variables es el Downhill Simplex de Nelder y Mead, (1965) cuyo resultado se obtiene

de un universo de valores limitados por los valores máximos y mínimos que puede tomar las variables y depende de la comparación y remplazo del vértice de mayor valor por otro punto asociado a los dos vértices de menores valores. A pesar que el proceso de optimización en los modelos es complejo debido al gran número de variables a optimizar, se llevó a cabo mediante este método por su simplicidad y eficiencia.

3.5.2. Diagrama de flujo del modelo DOPW.

En el modelo DOPW (Figura 3.2), para obtener las variables a optimizar con el Simplex se establece un rango de valores máximo y mínimo posible, obteniendo así un conjunto de opciones dentro de las cuales el optimizador selecciona: la dotación del pivot (Q_p), el coeficiente (c_w) de la curva característica de la bomba en el sondeo; los diámetros de las tuberías en la impulsión (D_{iw}), distribución (D_{dw}) y del pivot (D_p). A partir de allí calcula las formas de la curva característica y de eficiencia de la bomba, determina las horas de operación para cada mes durante la campaña de riego y la potencia de bomba que minimiza los C_T . El modelo realiza un número de repeticiones ($n = 3\ 000$) de cálculo, permitiendo elegir los C_T y extraer todas las variables y cálculos asociados a dichos valores (**Figura 3.14**).

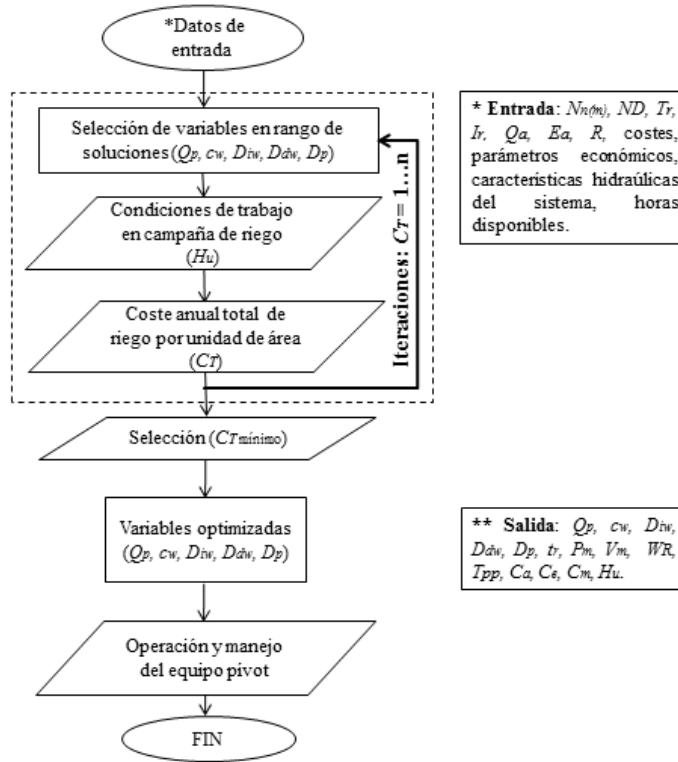


Figura 3.14. Diagrama de flujo generalizado del modelo DOPW

Dado que uno de los principales problemas en el manejo y diseño de equipos pívot es la posibilidad de que se produzca escorrentía en el extremo, el modelo DOPW incorpora una subrutina de cálculo a partir de las características de suelo, intervalo entre riegos (I_r) y necesidades netas de riego $N_{n(m)}$ para optimizar; el tiempo de riego del pívot (t_r), la pluviosidad máxima (P_m), tiempo de paso del pívot sobre un punto para que no haya escorrentía (T_{pp}), la velocidad mínima de la maquina (V_m) y anchura de mojada mínima en el extremo de la máquina (W_R).

Además de las principales variables de optimización (Q_p , c , D_{iw} , D_{dw} y D_p) y las variables sobre manejo y operación del equipo pívot, (t_r , T_{pp} , V_m , W_R), se obtienen otros componentes del modelo como las ecuaciones de las curvas características y de rendimiento de la bomba, la potencia absorbida (N_p), las horas usadas en el bombeo

(H_U) en cada mes de la campaña de riego según los periodos tarifarios ($P1$, $P2$ y $P3$), la discriminación de costes anuales totales por unidad de área C_e , C_a y C_m . Cada uno de estos costes están detallados tanto en el sondeo como en el equipo pívot (**Figura 3.14**).

3.5.2.1. Método para estimar la evolución de la demanda de agua en el sistema pívot.

Para determinar los caudales demandados durante la campaña de riego, se ha utilizado una metodología a partir de las necesidades medias mensual de agua de los cultivos (L_m) que consiste en cuantificar la demanda media diaria de agua ($L\ s^{-1}$) durante la campaña de riegos en función de la superficie a regar (S), el tiempo de riego (t_r) la evapotranspiración de la alternativa de cultivos (ETc) (calculada por la ecuación de Penman Monteith), la eficiencia de riego (E_a), y las pérdidas producidas por evaporación en la balsa (E_b). Esta metodología se usó para el proceso de optimización con los modelos DOPW y DEPIRE, y en una primera etapa del modelo de cálculo DRODN. Se obtuvo la demanda diaria dividiendo ETc mensual por número de días de cada mes obteniendo de esta forma el valor medio de ETc en $mm\ día^{-1}$.

3.5.3. Diagrama de flujo del modelo DEPIRE.

En el modelo DEPIRE (Figura 3.4), además de las variables a optimizar con el modelo DOPW (Q_p , c_w , D_{iw} , D_{dw} y D_p); por el hecho de incluir una balsa intermedia entre el sondeo y el equipo pívot se incorporan variables adicionales como el caudal bombeado del sondeo a la balsa (Q_w) y los correspondientes diámetros de las tuberías de impulsión (D_{ip}) y distribución al pívot (D_{dp}), y el coeficiente (c_B) de la curva característica de la bomba en el rebombeo; a partir de allí se calculan las formas de las curvas características y de eficiencias de las bombas en sondeo y balsa con sus

respectivas potencia de bomba; y las horas de operación de bombeo en sondeo (H_U) y balsa (H_{UB}) para cada mes durante la campaña de riego que minimizan los C_T . El modelo también incluye una subrutina para el diseño del volumen útil óptimo de la balsa (V_u) y las dimensiones de la balsa (L , $H1$ y $H2$) que la conforman. Al igual que el caso DOPW el modelo realiza un número de repeticiones ($n = 2\ 000$) de cálculo, permitiendo al final del ciclo de cálculos elegir los C_T , todas las variables y cálculos asociados a dichos valores (**Figura 3.15**).

En cuanto a las variables para el adecuado manejo y operación del equipo, el modelo DEPIRE utiliza la subrutina para calcular las variables con los datos de entrada requeridos en el diagrama de flujo del modelo DOPW.

Para obtener las variables que definen las dimensiones de la balsa se desarrolló un algoritmo (apartado 3.5.3.1). Adicionalmente a las principales variables de optimización Q_w , Q_p , c_B , c_w , D_{ip} , D_{dp} , D_{iw} , D_{dw} , D_p y V_T y las variables sobre manejo y operación del equipo pívot, el modelo también proporciona los valores optimizados de otros componentes como las ecuaciones de las curvas características y de rendimiento de las bombas y las potencias absorbidas, las horas usadas en el bombeo (H_U) en el sondeo y (H_{UB}) en la balsa para cada mes de la campaña de riego según los periodos tarifarios ($P1$, $P2$ y $P3$), la discriminación de costes anuales totales por unidad de área C_e , C_a y C_m , así como los costes en sondeo, en balsa y en equipo pívot más rebombeo (**Figura 3.15**).

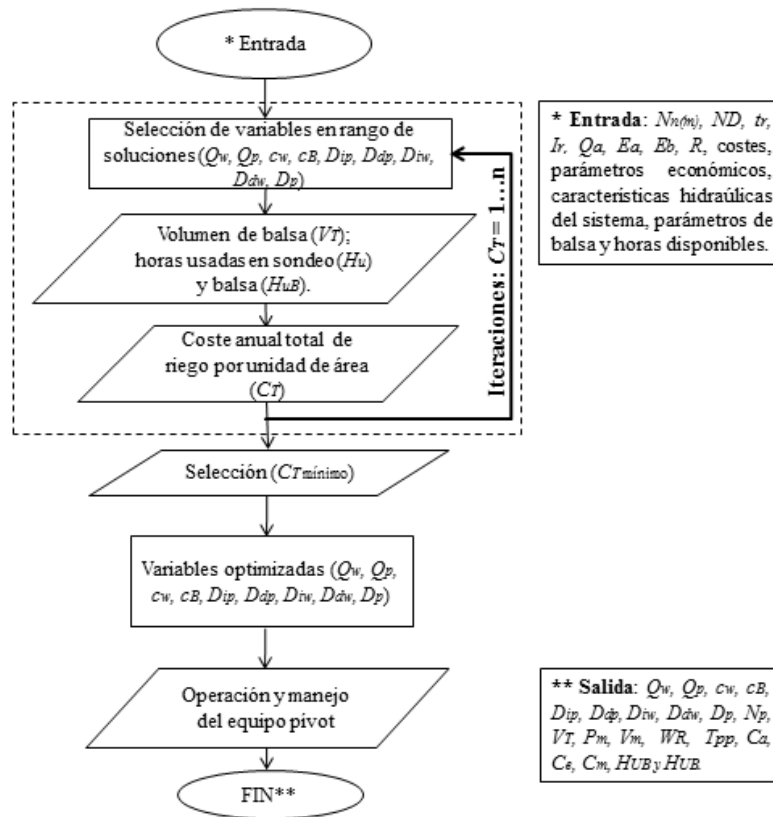


Figura 3.15. Diagrama de flujo generalizado del modelo DEPIRE

3.5.3.1. Algoritmo para determinar las dimensiones de la balsa.

Las dimensiones de L , $H1$ y $H2$ para un volumen de almacenamiento determinado se calculan iterativamente (Pulido-Calvo et al., 2006) como sigue:

1. Se selecciona un valor inicial de $(H1 + H2)$ y con la **ecuación 3.1** se obtiene L , considerando que $L > (H1 + H2)$.
2. Los valores de $H1$ se determinan con las **ecuaciones 3.2 y 3.3** usando el método numérico de Newton (Conte y Boor, 1974), finalizando su proceso iterativo cuando se cumple que $|H1_{k+1} - H1_k| \leq 0,001$. $H2$ se calcula como

diferencia entre la altura del agua contenida en la balsa ($H1 + H2$) y $H1$. De este modo se incrementa el valor de ($H1 + H2$) y se calculan nuevos valores de $H1$, $H2$ y L .

3. Se repite el proceso anterior hasta conseguir, para un volumen determinado, las dimensiones geométricas que hagan mínimos los costes del depósito. (Figura 3.16).

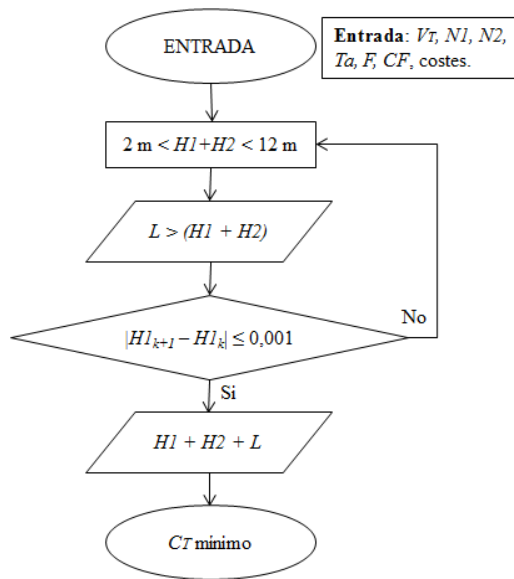


Figura 3.16. Organigrama de cálculo para determinar las dimensiones óptimas de la balsa semienterrada (L , $H1$ y $H2$).

3.5.4. Diagrama de flujo del modelo DRODN.

El modelo DRODN (Figura 3.6) se diferencia del modelo DEPIRE en que optimiza el uso de balsas de almacenamiento y regulación para abastecer el caudal y la presión necesarios en cabecera de la red durante la campaña de riegos. Los cálculos de demanda de agua en la red se realizaron con dos metodologías complementarias, la de la demanda media diaria (L_m) y la de las curvas aleatorias de demanda diaria

(*RDDC*) para el periodo de consumo punta (10 días) (**apartado 3.5.4.1.**) a fin de obtener el volumen útil óptimo de balsa (V_u) ó el volumen de regulación (V_r) (**Figura 3.17**).

El volumen útil de la balsa (V_u), por una parte deberá ser capaz de regular (V_r) la máxima demanda de agua de los cultivos durante el periodo del consumo punta, y por otra tener como valor mínimo el correspondiente a la mayor demanda de agua diaria en todo el período de funcionamiento del sistema (V_d), para lo que se plantea un proceso en dos etapas:

1. En una primera etapa se obtiene la primera aproximación del volumen de regulación (V_{r1}) junto con el tiempo de operación óptimo de la red (OT) y de la extracción de agua del sondeo (OT_w) durante toda la campaña de riegos aplicando el modelo DRODN con la metodología de demanda que considera las necesidades medias mensuales de agua de los cultivos (L_m), eligiendo como valor de V_{u1} el mayor de V_{r1} y V_{d1} .
2. En una segunda etapa se comprueba la capacidad de regulación del V_{u1} obtenido en la primera etapa, fijando como valor de OT el antes calculado, y obteniendo los balances de volumen en la balsa cada 15 min durante el periodo de funcionamiento de los 10 días críticos del mes de máxima demanda del cultivo, estimado los caudales demandados con la metodología de curvas aleatorias de demanda diaria (*RDDC*).

El valor de V_u definitivo será el mayor de V_{u1} y aquel que cumpla con esta capacidad de regulación con la demanda de agua obtenida aplicando el algoritmo de *RDDC* (Figura 3.17).

Las variables a optimizar son: a) el caudal de bombeo desde el sondeo a la balsa (Q_w) y el de rebombeo desde la balsa hasta la red de riego (Q_R); b) los coeficientes de la curva característica de la bomba en el sondeo (c_w) y en el rebombeo (c_B) que determinan la forma óptima de las mismas; c) los diámetros de la tubería de

impulsión (D_{iw}) y distribución (D_{dw}) en el sondeo, y los diámetros de la tubería de impulsión (D_{iR}) y distribución (D_{dR}) en el rebombeo; d) las dimensiones de la balsa de regulación de acuerdo con el volumen óptimo a almacenar (V_u) y costes de inversión y de operación en sondeo, balsa y sistema de riego. Otros componentes del modelo optimizados son: las potencias de bombeo y rebombeo, el número de horas usadas en el bombeo en la extracción de agua del sondeo (H_U) y en el rebombeo ha al red de riego desde la balsa (H_{UR}) para cada mes de la campaña de riego según los periodos tarifarios ($P1$, $P2$ y $P3$), el número de horas de funcionamiento al día en la extracción de agua del sondeo (OT_w) y el rebombeo a la red (OT). Los costes anuales totales por unidad de área C_e , C_a y C_m , así como los costes de extracción de agua del sondeo, y de rebombeo a la red de riego a la demanda (**Figura 3.17**).

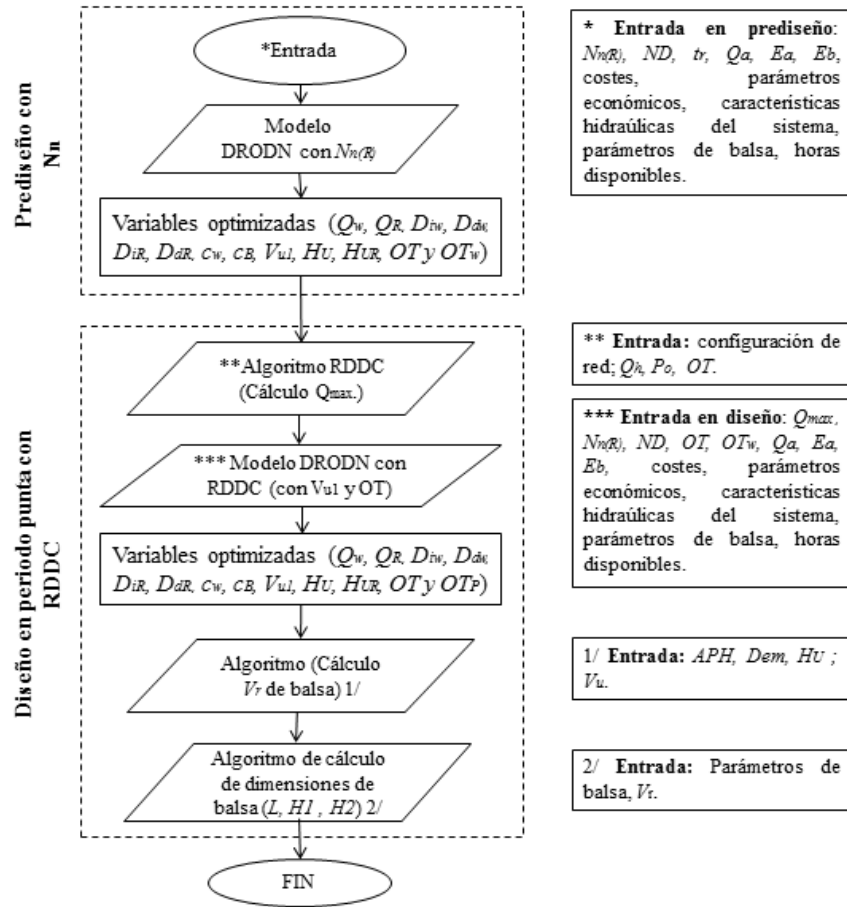


Figura 3.17. Diagrama de flujo generalizado del modelo DRODN.

3.5.4.1. Métodos para estimar la evolución de la demanda de agua en las redes colectivas de riego.

Para determinar los caudales demandados durante la campaña de riego, se han utilizado dos metodologías: una a partir de las necesidades medias mensuales de agua de los cultivos (L_m) (apartado 3.5.2.1), y otra determinando el caudal demandado mediante la metodología de curvas aleatorias de demanda diaria (RDDC) (Moreno et al., 2007b), solo para el caso de redes colectivas, según se describe a continuación:

La segunda metodología (RDDC): consiste en obtener la distribución de los caudales demandados en la cabecera de la red de riego para el periodo punta de consumo de agua por los cultivos a partir de la generación de curvas aleatorias de demanda diaria máxima, considerando la apertura aleatoria de hidrantes durante el tiempo de operación de la red al día (OT) previamente obtenida con la metodología L_m para el mes punta. La metodología tiene en cuenta además los parámetros de riego (intervalo entre riegos (I_r) y tiempo de riego (T_r) de cada parcela), la presión necesaria en cada hidrante (P_o) y el caudal necesario en cada hidrante (Q_h). El caudal demandado en cabecera de la red a lo largo de un día se calculó como suma del caudal de los hidrantes abiertos en cada momento, considerando un intervalo de 15 min entre posibles aperturas de hidrantes durante el OT . Este caudal permite calcular el volumen de la balsa con DRODN considerando el caudal máximo (Q_{max}) obtenido con $RDDC$ durante los 10 días de máximas necesidades de agua, y evaluar la capacidad de regulación de la balsa en periodo punta. Para el resto de los días de la campaña de riego la demanda se cuantificó con la primera metodología (L_m).

Con la metodología $RDDC$ se genera un gran número de curvas de demanda diaria y, haciendo un análisis estadístico, se puede obtener la curva que representa el 96% de los casos simulados, que podría considerarse como el caudal de diseño de la red (**Figura 3.18**).

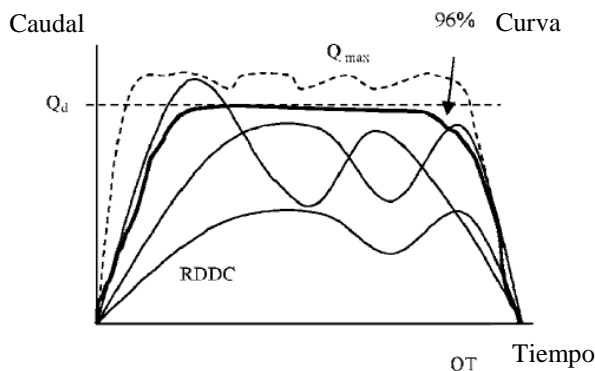


Figura 3.18 Esquema de curvas aleatorias de demanda diaria ($RDDC$).

Dada la importancia de la metodología RDDC (Moreno et al., 2007b) para esta investigación, a continuación se presenta esta metodología paso a paso:

- 1. Apertura aleatoria diaria de hidrantes:** El primer paso es obtener la probabilidad de funcionamiento de un hidrante en un día específico (p_d). Este valor dependerá de si el tiempo de riego de una parcela ($t_p = N_s t_r$) es mayor o no que el tiempo diario de operación (OT), siendo N_s el número de sectores en que se ha dividido la parcela y t_r el tiempo de riego de un sector. Si $t_p > OT$, se considera como tiempo de funcionamiento del hidrante el tiempo de riego de un día (OT) y el tiempo restante hasta t_p es considerado en el próximo cálculo. Así será

$$p_d = \frac{N_d}{I_r} \quad (3.49)$$

donde N_d = número de días necesarios para regar una parcela.

Para simular la apertura aleatoria de un hidrante, se requiere generar un número aleatorio (R_d) entre 0 y 1. Si $p_d > R_d$ se asume que el hidrante está abierto ese día, de otra manera estará cerrado.

- 2. Determinación del tiempo de riego diario de cada parcela:** El tiempo de riego diario de cada parcela (t_{rd}) se expresa como

$$t_{rd} = N_{sd} t_r \quad (3.50)$$

donde N_{sd} = Número de sectores de riego en un día.

Cuando se requiere más de un día para regar una parcela, debe ser considerado un t_{rd} diferente dependiendo del número de sectores que es necesario regar cada día. Con el fin de simular esta situación con la metodología *RDDC*, el día de inicio del riego es elegido aleatoriamente. Así, por ejemplo, si un sector de riego requiere un

tiempo de riego de $t_r = 6,5$ h; con un intervalo de riego de $I_r = 5$ días y la parcela está dividida en $N_s = 3$ sectores, para $OT = 18$ h día⁻¹, se asume que solamente 2 (dos) sectores pueden ser regados el primer día ($t_{rd} = 2 \times 6,5 = 13$ h) y el otro sector de riego debe ser regado el siguiente día con $t_{rd} = 6,5$ h. Por tanto la probabilidad de funcionamiento del hidrante en un día específico (p_d) sería $2/5 = 0,4$; porque 2 de los 5 días del intervalo son necesario para regar la parcela. Esta metodología de elección aleatoria de los hidrantes regaría 13 h un día y 6,5 h al día siguiente, manteniendo el I_r para las siguientes simulaciones.

Para asignar la apertura aleatoria de ese hidrante se utiliza un número aleatorio (R_n) entre 0 y 1. Así, en el ejemplo, puesto que la probabilidad de no regar es $3/5$, $1/5$ para un riego con $t_r = 6,5$ h y $1/5$ para un riego con $t_r = 13$ h:

si $R_n \leq 1/5$, se considerará un $t_r = 6,5$ h,

si $1/5 < R_n \leq 2/5$, el tiempo de riego sería de 13 h, y

sí $R_n > 2/5$, el hidrante no regaría ese día.

3. **Determinación de la validez del escenarios simulado:** A fin de validar un escenario específico generado, el volumen total descargado durante OT tiene que coincidir con el requerimiento de agua de los cultivos para ese día (V_d), con un error máximo de 5%.
4. **Determinación aleatoria del inicio del riego:** Para estimar la evolución diaria de la demanda de agua en el origen de la red, se parte como dato del volumen de agua requerido en un día (V_d). Como datos adicionales se necesita para cada hidrante el caudal o dotación (d_i), el tiempo de riego (t_r), el intervalos de riego (I_r), numero de sectores de riego de la parcela (N_s), numero de sectores regados en ese día (N_{sd}),

número de días requerido para regar la parcela (N_d), y tiempo de operación de la red (OT). Para generar la curva $RDDC$, el OT de la red se divide en cortos intervalos de tiempo (por ejemplo, 15 min). Entonces se obtiene una simulación aleatoria de apertura del hidrante seleccionando de forma aleatoria el momento de inicio de apertura de cada hidrante en un día, en un periodo de tiempo entre el inicio de OT y el OT menos el mínimo tiempo de riego por día (t_{rd}). Por tanto, esta metodología no considera el concepto de probabilidad de apertura del hidrante como lo hace la metodología de Clément. A fin de calcular este paso, un número aleatorio (R_o) entre el inicio OT (0 h), y $OT-t_{rd}$ es generado para todos los hidrantes que se abren en un día específico (paso 1). Puesto que OT se ha dividido en intervalos de 15 min (0,25 h), cada hidrante se abrirá al inicio del intervalo en el cual caiga el R_o . Por ejemplo, si $R_o = 11,17$, el hidrante abrirá a las 11, porque 11,17 está en el intervalo (11 – 11,25).

5. Determinación de la curva aleatoria de demanda diaria $RDDC$:

Una vez conocidos los hidrantes abiertos en cada intervalo de tiempo en que se ha dividido el OT se obtiene el caudal en cabecera de la red sumando los caudales de los hidrantes abiertos (Figura 3.18). Conociendo en todo momento la ubicación de las parcelas regadas (hidrantes abiertos), la presión necesaria en cabecera para garantizar la presión mínima requerida en todos los hidrantes también puede ser determinada.

La desviación estándar de la $RDDC$ generada depende del intervalo de tiempo en el cual OT se ha dividido (Planells et al., 2005). Las diferencias son causadas por la mayor probabilidad de acumulación de demanda cuando los intervalos de tiempo en que se divide OT son mayores, llevando a un pico en ciertos momentos del

día. Aunque en principio todos los intervalos de tiempo en que se ha dividido OT tienen la misma probabilidad de aperturas de toma, pueden generarse curvas con subconjuntos de intervalos más probables (Pulido-Calvo et al., 1998), dependiendo del coste de la electricidad durante el día (ó hábitos de riego) (ejemplo, riego por la noche y los fines de semanas). Una forma de implementar esto en el proceso es establecer las condiciones para distribuir una proporción del volumen diario en horas particulares del día. Entonces la probabilidad de operación no es la misma para todas las horas del día, y la curva de caudales obtenida del sistema no se ajustará a una distribución normal, requiriendo el uso de otras funciones de densidad de probabilidad tal como la distribución de Weibull (Mavropoulos, 1997). El número mínimo de *RDDC* generadas que estabilizan el coeficiente de variación (*CV*) es 1.000 – 1.200 (Moreno, 2005).

6. **Caudal de diseño en cabecera de la red:** Una vez que son generadas el suficiente número de *RDDCs*, se puede obtener la envolvente de los caudales máximos con los puntos de máximo gasto de cada intervalo (Figura 3.18). Este caudal siempre es menor que el correspondiente a todos los hidrantes abiertos simultáneamente, pero la red raramente demanda el máximo gasto. A fin de determinar el caudal de diseño, se considera que la distribución de gasto generada se ajusta a una distribución normal para cada uno de los intervalos en los cuales el *OT* ha sido dividido y se considera como caudal de diseño el correspondiente al 96% de probabilidad (Figura 3.18).

Para aplicar esta metodología se desarrolló un software bajo entorno Matlab y se incorporó como una subrutina de cálculo en el modelo DROND. Partiendo de los datos de la red de riego a la demanda en “La Grajuela” tales como ubicación de hidrantes, necesidades de caudal y presión en cada parcela, el modelo genera los

caudales demandados en cabecera de la red y las correspondientes necesidades presión en función de los hidrantes abiertos en intervalos de 15 min durante los días que le son solicitados.

3.5.4.2. Algoritmo para determinar volumen de regulación (V_r) de la balsa.

Una vez optimizadas las variables y otros componentes del modelo se evalúa la posibilidad de reducir el volumen de la balsa a través de un algoritmo con el cual se harán reducciones sucesivas de V_u , donde se evaluará en cada reducción el adecuado funcionamiento de la balsa según V_u hasta obtener el V_r que permite trabajar la balsa en su volumen mínimo (Figura 3.19). Para el cálculo de V_r se ha desarrollado una metodología que parte de la demanda diaria de agua de la red en periodo punta y las correspondientes necesidades de rebombeo a la red de riego (D_{em}), el aporte potencial horario del bombeo (APH) para llenado de la balsa y las horas optimizadas para el llenado (H_U) y vaciado de la balsa (H_{UR}) teniendo en cuenta los costes de la energía en los distintos periodos tarifarios. Solo cuando los condicionantes del acuífero introduzcan limitaciones en el caudal de extracción de agua (Q_a), puede ocurrir que $V_r > V_d$.

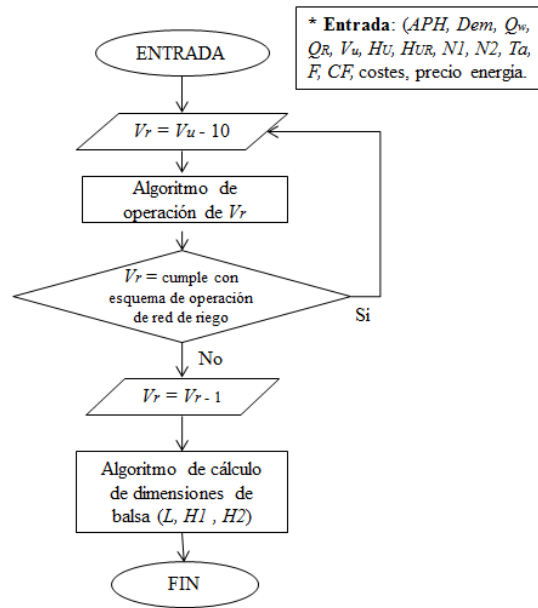


Figura 3.19. Organigrama de cálculo de volumen de regulación (V_r) en balsa.

El fundamento del algoritmo se basa en el concepto de período de vaciado (v) propuesto por López-Luque et al. (1993) definiéndose éste, como el intervalo de tiempo (de 15 min) ($i < j \leq i+k$) en cuyo intervalo inicial t_{i+1} la balsa tiene almacenado un volumen útil determinado y en cuyo intervalo final t_{i+k} se producirá un déficit (volumen almacenado igual o menor que el volumen útil de almacenamiento). De este modo, habrá diferentes períodos de vaciado durante el período de funcionamiento evaluado (10 días de máxima demanda). Si V_j es el volumen útil almacenado en intervalo j , se podrá definir un volumen útil de recepción de agua (VR_j) como:

$$VR_j = V_{max} - V_j \tag{3.51}$$

donde V_{max} el volumen útil máximo de almacenamiento. El algoritmo se inicia con la balsa llena de agua, es decir que el valor inicial de V_j ($t = 0$) es V_{max} .

Se define el aporte potencial *APH*, como el volumen que se aportaría a la balsa en el intervalo de 15 min, bombeando el caudal óptimo de diseño. El vector *E* ($E_i, \dots, E_j, \dots, E_{i+k}$) representa los volúmenes impulsados en cada intervalo *j*. Para cada intervalo *j*, se pueden realizar diversos bombeos en diferentes períodos de vaciado (u, v, \dots, z); $E_j = E_{j,u} + E_{j,v} + \dots + E_{j,z}$.

El déficit que ocurre al final de un determinado período de vaciado *v* de la balsa deberá ser corregido incrementando el volumen de agua almacenada en algún intervalo *j* perteneciente a dicho periodo ($i < j \leq i+k$). El algoritmo seleccionará la hora de mayor bonificación energética dentro del *v* de la balsa de regulación. El incremento de volumen a bombear en dicho intervalo *j* estará condicionado por:

1. El déficit producido al final del período de vaciado *v*, $-V_{i+k,v}$.
2. La diferencia entre el *APH* y el volumen impulsado en el intervalo *j* en algún periodo de vaciado *u* anterior al *v*, $APH - E_{j,u}$.
3. El mínimo volumen de recepción de los intervalos comprendidos entre el intervalo *j* elegido para el bombeo y el intervalo final (*i+k*) del período de vaciado *v*, $\min (VR_{j,v}, VR_{j+1,v}, \dots, VR_{i+k,v})$.

El incremento de volumen que habrá que realizar en el intervalo *j* mediante bombeo será:

$$\Delta(V_{j,v}) = \min[-V_{i+k,v}, \min(VR_{j,v}, VR_{j+1,v}, \dots, VR_{i+k,v}), (APH - E_{j,u})] \quad (3.52)$$

Una vez incrementado el volumen en el intervalo *j*, realizando un incremento de $E_{j,v} = \Delta V_{j,v}$, los volúmenes disponibles para el periodo comprendido entre el intervalo *j* elegido para el bombeo y el intervalo final (*i+k*) del período de vaciado *v* se verán incrementados en igual magnitud. Tras esta operación el déficit del periodo final del intervalo de vaciado *v* se habrá eliminado o se habrá corregido. Habiéndose cumplido alguna de las tres condiciones siguientes:

- a) Se ha cubierto el déficit en el intervalo $i+k$ ($-V_{i+k,v}$), satisfaciéndose las demandas del período de vaciado v (ecuación 3.53). Seguidamente, se analiza el siguiente periodo ($i+k+1$) y, caso de que exista déficit, se procederá de la forma descrita para corregirlo, quedando el período de vaciado igual al anterior incrementado en un periodo: ($i, i+k+1$). En caso que no exista déficit se analiza el siguiente periodo ($i, i+k+2$)

$$\Delta(V_{j,v}) = -V_{i+k,v} \quad (3.53)$$

- b) No se ha satisfecho el déficit del intervalo $i+k$, pero se ha reducido (ecuación 3.54), con un incremento de volumen dado por la ecuación 3.55. El período de vaciado se habrá reducido iniciándose el nuevo período en la hora h con ($j < h \leq i+k$).

$$-V_{i+k,v} = -V_{i+k,v} + \Delta(V_{j,v}) \quad (3.54)$$

$$\Delta(V_{j,v}) = \min (VR_{j,v}; VR_{j+1,v}; \dots; VR_{i+k,v}) \quad (3.55)$$

- c) No se ha satisfecho el déficit del intervalo $i+k$, si bien se habrá reducido, siendo el nuevo déficit el calculado por la expresión (3.54), con un incremento de volumen dado por la ecuación (3.56). Como el aporte realizado en el intervalo j será igual al **APH**, dicho intervalo ya no será hábil para corregir el nuevo déficit. De este modo, se deberá reasignar el valor de j dentro del período de vaciado v para corregir el nuevo déficit. Este nuevo intervalo de j será el siguiente con mayor bonificación energética dentro del período de vaciado v .

$$\Delta(V_{j,v}) = APH - E_{j,u} \quad (3.56)$$

Se procede de la misma manera para el nuevo déficit y el nuevo período de vaciado, y el proceso iterativo se completa hasta cubrir todo el período de funcionamiento del sistema para los 10 días de máxima demanda de agua del sistema de riego. Se habrá obtenido de esta forma, la distribución de volúmenes bombeados

en cada período de funcionamiento mediante el vector E , para un volumen de almacenamiento de la balsa de regulación, con lo cual se puede obtener la funcionalidad del sondeo (objetivo principal del algoritmo) y los coste de energía (C_e), con H_u y precio de la energía (Figura 3.20).

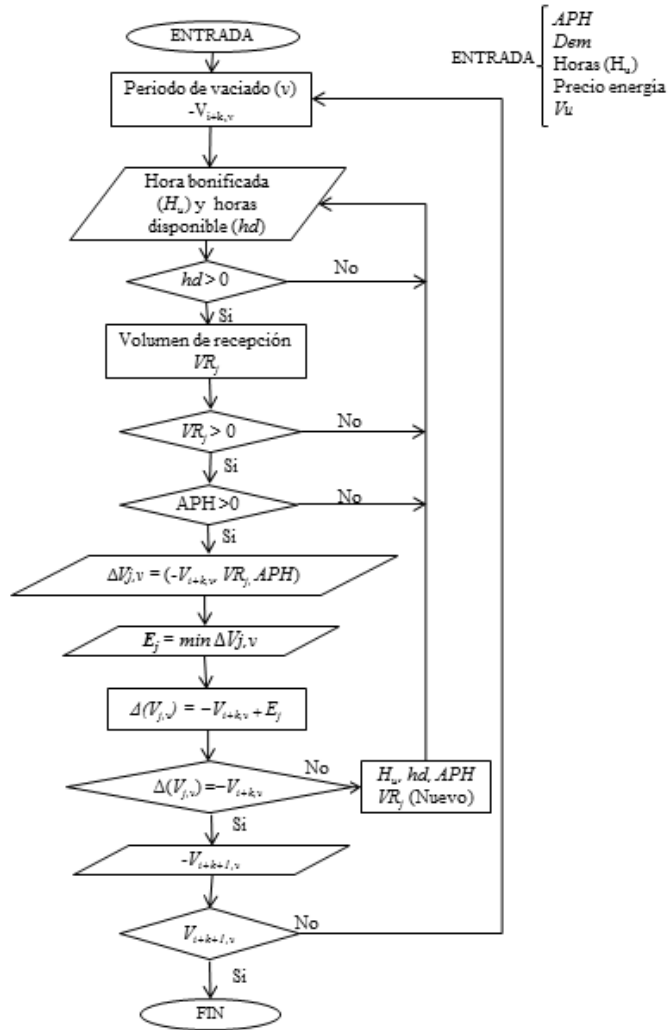


Figura 3.20. Algoritmo de política de bombeo en red de riego alimentada desde balsas.

3.5.5. Costes de extracción del agua (C_w) y de aplicación del agua de riego (C_A) con equipos pívot (modelos DOPW y DEPIRE).

Como se indicado antes, se consideran dos escenarios de coste total (C_T), uno de bombeo directo (C_{TD}) y otro de bombeo con balsa de regulación intermedia (C_{TB}). Dentro del C_T se puede distinguir a su vez entre el coste de extracción del agua (C_w) y el coste de aplicación del agua por el sistema de riego (C_A), siendo el C_T la suma de los dos. El C_w es el de transportar el agua desde la fuente hasta la superficie del terreno (salida del sondeo (C_{wD}) o a la balsa (C_{wB})) incluyendo los costes de inversión y de operación en este proceso, dejando el agua a presión atmosférica a la salida. El C_A es el coste de llevar al agua desde la superficie del terreno hasta su aplicación en parcela por el sistema de riego (desde la salida del sondeo (C_{AD}) o desde la balsa (C_{AB})).

El coste anual de extracción del agua por unidad de volumen bombeado (C_w ; € m⁻³) (ecuación 3.57), es la suma de los costes anuales de inversión (C_{wa} ; € ha⁻¹ año⁻¹, incluido el 5% para mantenimiento) y de energía (C_{we} ; € ha⁻¹ año⁻¹). De la misma manera el coste anual de aplicación del agua por unidad de volumen bombeado (C_A ; € m⁻³) (ecuación 3.58), es la suma de los costes anuales de inversión (C_{Aa} ; € ha⁻¹ año⁻¹, incluido el 5% para mantenimiento) y de energía (C_{Ae} ; € ha⁻¹ año⁻¹).

$$C_w = (C_{wa} + C_{we}) * N_n^{-1} * E_a \quad (3.57)$$

$$C_A = (C_{Aa} + C_{Ae}) * N_n^{-1} * E_a \quad (3.58)$$

Siendo N_n las necesidades netas de agua de los cultivos regados en m³ ha⁻¹ año⁻¹ y E_a la eficiencia general de aplicación del agua de riego.

3.5.6. Costes de extracción del agua (C_w) y de alimentación a la red de riego colectiva de riego a la demanda (C_R) (modelo DRODN).

Como se ha indicado antes, se consideran dos escenarios para el cálculo de la demanda de agua de la red que conducen a dos estimaciones del coste total (C_T), uno considerando la demanda de agua media mensual del cultivo (L_m) y otro utilizando el método de las curvas aleatorias de demanda diaria (RDDC). Dentro del C_T se puede distinguir a su vez entre el coste de extracción del agua por unidad de volumen bombeado (C_w , € m⁻³) y el coste de entrega del agua a la cabecera de la red de riego por unidad de volumen bombeado (C_R , € m⁻³), siendo el C_T la suma de los dos. El C_w (ecuación 3.59) incluye los costes de inversión (C_{aw}) y de operación (C_{ew}) en este proceso, dejando el agua a presión atmosférica a la salida. El C_R (ecuación 3.60) es el de llevar el agua desde la balsa hasta la cabecera de la red de riego, con las condiciones de presión y caudal que necesite la red en cada momento.

$$C_w = (C_{aw} + C_{ew}) N_n^{-1} E_a \quad (3.59)$$

$$C_R = (C_{aR} + C_{eR}) N_n^{-1} E_a \quad (3.60)$$

donde C_{aw} y C_{aR} = los costes anuales de inversión, incluido el 5% para mantenimiento, (€ ha⁻¹ año⁻¹) para la extracción y suministro de agua a la red respectivamente; C_{ew} y C_{eR} = los costes anuales de energía (€ ha⁻¹ año⁻¹) para la extracción y suministro de agua a la red respectivamente.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el caso de los equipos pívot, una vez diseñadas las herramientas de cálculos y obtenidos los resultados y su discusión, el análisis se enfoca en determinar los costes anuales totales de aplicación por unidad de área regada (C_T) con pívot alimentado directamente desde sondeo (modelo DOPW) y con pívot alimentado desde una balsa intermedia (modelo DEPIRE) para los niveles dinámicos (ND) y tamaños de pívots considerados para el análisis. Posteriormente se hizo una comparación de costes entre alimentar los pívots directamente desde sondeo y utilizando una balsa de regulación intermedia.

Los resultados de C_T obtenidos por los modelos DOPW y DEPIRE permiten analizar cada uno de sus componentes detallados en costes de inversión (C_a) y costes de operación (C_e) por unidad de área regada y por unidad de volumen bombeado, tanto en la extracción de agua del sondeo como en la aplicación de agua por el equipo pívot.

La presentación de los resultados obtenidos con el modelo DRODN comienza con la discusión del efecto de las metodologías de estimación de demanda de agua en la red de riego (en base a los valores medios mensuales, L_m , o a la utilización de las curvas aleatorias de demanda diaria, $RDDC$) sobre el tamaño de balsa y sobre el C_T , visualizando sus componente de inversión (C_a) y operación (C_e), tanto en la extracción como en la entrega de agua a la red. Posteriormente se hace un análisis detallado sobre la interacción entre las variables de caudal, potencia y horas de usadas para el bombeo, tanto en el proceso de extracción de agua del sondeo como en el suministro de agua a la red de riego. Esto permite analizar más fácilmente las razones y condicionantes que conducen a los C_T mínimos, así como la interacción entre lo que sucede en el sondeo y en la red de riego a la demanda, lo que justifica la importancia de disponer de herramientas como DRODN para este tipo de estudios.

4.1. COSTE TOTAL DE APLICACIÓN DEL AGUA DE RIEGO CON PÍVOT ALIMENTADO DIRECTAMENTE DESDE SONDEO (C_T).

Como era de esperar, el C_T aumenta exponencialmente con el ND para todas las superficies (S) evaluadas (**Tabla 4.1**), con diferencias de costes de hasta 324% debido principalmente al aumento de la potencia de bombeo necesaria y el correspondiente aumento de los costes energéticos. La proporción de aumento de los C_T son mayores en los ND pequeños, siendo, para $S = 50$ ha de 9,82 € ha⁻¹ año⁻¹ m⁻¹ cuando el ND pasa de 0 a 10 m, y reduciéndose a 2,41 € ha⁻¹ año⁻¹ m⁻¹ cuando el ND pasa de 150 a 200 m. Los costes de inversión y operación varían exponencialmente con las superficies evaluadas, presentando un mínimo en torno a 70 ha con los diferentes ND .

Tabla 4.1. Coste total (C_T € ha⁻¹ año⁻¹) de aplicación de agua de riego con pívot alimentado directamente desde sondeo (valores mínimos en negritas).

Superficie (ha)	NIVEL DINÁMICO (m)							
	0	10	50	75	100	125	150	200
30	685	781	1 163	1 401	1 642	1 877	2 117	2 598
50	593	691	1 062	1 293	1 527	1 765	2 001	2 482
70	587	678	1 057	1 283	1 522	1 752	1 989	2 487
100	618	705	1 068	1 332	1 528	1 781	2 023	2 582
125	698	785	1 145	1 405	1 625	1 904	2 153	2 774
150	770	865	1 216	1 465	1 739	1 939	2 272	2 914

El coste de la energía (C_e) es el principal componente del C_T . Así, para $S = 70$ ha el C_e representa entre el 43 y 78% de C_T cuando el ND pasa de 0 a 200 m respectivamente (Figura 4.1). Para un $ND = 100$ m el C_e representa entre el 61 y 76% de C_T cuando la superficie del pívot (S) pasa de 30 a 150 ha. Esta situación deja muy claro la importancia de los costes energéticos al momento de cualquier planificación

del riego con equipos pívot. Es importante resaltar que en la unidad hidrogeológica (HS 08.29) de la Mancha Oriental la mayoría de los ND están alrededor de los 100 m (Sanz, 2005) y los tamaños de pívot se encuentra entorno a 40-70 ha.

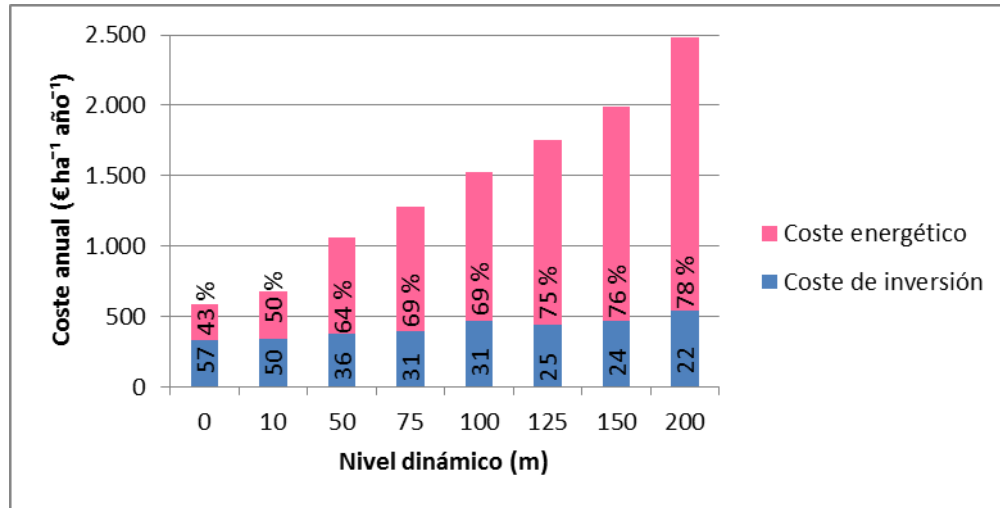


Figura 4.1. Descomposición y proporción del C_T para $S = 70$ ha, en coste de inversión y coste de la energía (incluido mantenimiento), bombeando directamente desde sondeo al pívot, para distintos niveles dinámicos.

Parecidos resultados fueron encontrados en el trabajo realizado por Montero et al. (2012), aunque aquí se ha realizado un análisis más minucioso del proceso en su conjunto, desde el origen del agua hasta su aplicación en parcela, con algunas diferencias en los resultados, ligados a que ellos consideraron un precio fijo del agua de riego (que incluía los costes de inversión y de energía para llevar el agua desde la fuente hasta la entrada del pívot), y al gran peso de la energía en el C_T . Las características principales del pívot óptimo de $S = 70$ ha para un $ND = 75$ m (representativo de la situación de hace unos 10 años en la HS 08.29) fueron: dotación de $1,47 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$, potencia de la bomba $140,3 \text{ kW}$; diámetros de 250 mm en la tubería

de impulsión, 315 mm en la de distribución y 219,1 mm (8 5/8') en tubería lateral del pívot, con un tiempo máximo de operación 17,85 h día⁻¹.

El diámetro óptimo de la tubería del pívot contrasta con el diámetro de tuberías usados normalmente en Castilla La Mancha 168,3 mm (6 5/8') para $S = 70$ ha (Tarjuelo, 2005) que están calculados para la situación en que la energía eléctrica era mucho más barata, y confirma los valores similares (8 5/8') encontrados por Moreno et al., 2012.

4.2. COSTE TOTAL DE APLICACIÓN DEL AGUA CON UN PÍVOT ALIMENTADO DESDE UNA Balsa INTERMEDIA DE REGULACIÓN (C_T).

En este caso (modelo DEPIRE) el C_T mínimo se obtiene para una parcela de $S = 100$ ha para la mayoría de los ND estudiados (Tabla 4.2).

Tabla 4.2. Coste total (C_T € ha⁻¹ año⁻¹) de aplicación de agua de riego con el sistema sondeo-balsa de regulación-pívot (valores mínimos en negritas).

Superficie (ha)	NIVEL DINÁMICO (m)							
	0	10	50	75	100	125	150	200
30	825	912	1 202	1 440	1 642	1 811	2 020	2 491
50	704	807	1 111	1 299	1 503	1 723	1 956	2 414
70	683	768	1 102	1 310	1 519	1 729	1 943	2 387
100	659	743	1 070	1 275	1 483	1 696	1 916	2 414
125	685	768	1 097	1 302	1 513	1 732	1 958	2 482
150	752	840	1 200	1 422	1 653	1 884	2 117	2 663

La proporción del coste energético (C_e) respecto a C_T en la situación con balsa intermedia entre el sondeo y el pívot para $S = 70$ ha pasan a ser de 32 a 71% cuando

el ND va de 0 a 200 m respectivamente. Para $ND = 100$ m, el C_e representa entre el 50 y 75% de C_T cuando la S del pivot va de 30 a 150 ha (Figura 4.2). Los resultados ponen de manifiesto que, a pesar de la reducción de los costes energéticos con el uso de balsa respecto al escenario de bombeo directo, el C_e siguen representando una alta proporción del C_T debido al mayor coste lo representa la extracción de agua desde el acuífero, además los casos de estudio se hicieron para el cultivo de maíz muy demandante de agua.

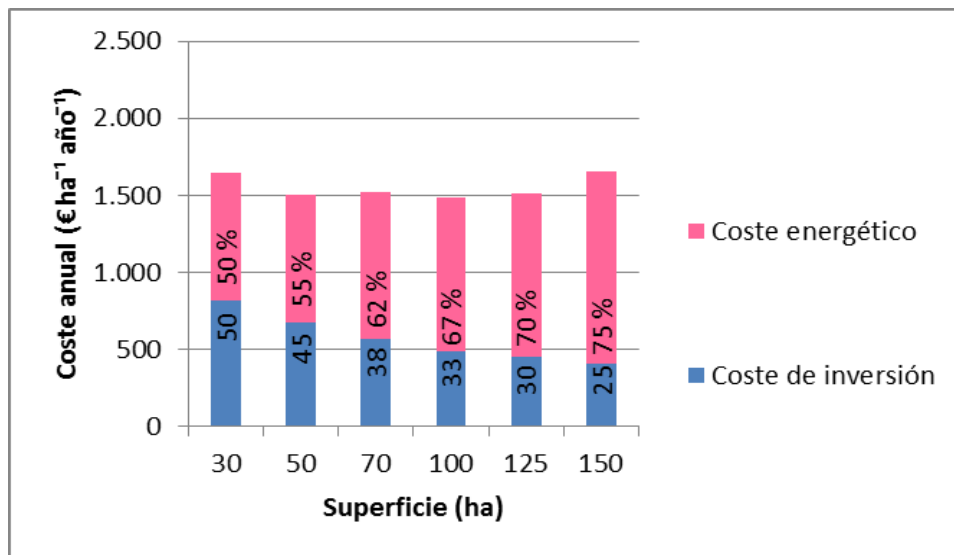


Figura 4.2. Descomposición y proporción del C_T para $ND = 100$ m, en coste de inversión y coste de la energía (incluido mantenimiento), utilizando una balsa de regulación intermedia, para distintas superficies regadas.

Para tener una idea de los costes en ambas opciones, en el caso por ejemplo de $S = 70$ ha y $ND = 75$ m, el C_T para la situación con balsa es un 2,1% superior al de la situación sin balsa ($1\,310$ € ha^{-1} $año^{-1}$ frente $1\,283$ € ha^{-1} $año^{-1}$), debido a los costes de inversión necesarios para la construcción de balsa, así como a que la suma de potencia de la bomba para la extracción de agua hasta la balsa (115,0 kW) y la

necesaria para el rebombeo al pívot (30,4 kW) es un 3,7% superior a la necesaria para alimentar el pívot directamente desde el sondeo (140,3 kW). Esta situación se invierte para $S \geq 100$ ha.

Por establecer una comparación con los resultados obtenidos en el bombeo directo al equipo pívot, las características principales del tamaño del pívot óptimo con $S = 70$ ha y de $ND = 75$ m alimentado desde una balsa regulación intermedia fueron: dotación de $1,47 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$, potencia de la bomba 30,4 kW; diámetros de 300 mm en la tubería de impulsión; 299,6 mm en la de distribución y 246 mm (10°) en tubería lateral del pívot, con un tiempo máximo de operación $17,94 \text{ h dia}^{-1}$. Con la excepción de las necesidades de potencia de rebombeo al pívot, la cual es pequeña debido al uso de balsa, las variables que definen la solución óptima del equipo pívot son similares a las del caso de alimentación del pívot con bombeo directo desde el sondeo.

4.3. COMPARACIÓN DEL COSTE TOTAL (C_T) DE APLICACIÓN DEL AGUA DE RIEGO CON SISTEMA PÍVOT ALIMENTADOS DIRECTAMENTE DESDE SONDEO Y CON UNA Balsa DE REGULACIÓN INTERMEDIA.

La **Figura 4.3** muestra que, para $ND \geq 100$ m, el C_T utilizando balsa de regulación es siempre menor que con bombeo directo al pívot en las superficies analizadas. La mayor diferencia del C_T entre las opciones de bombeo directo y utilización de balsas de regulación es de 20,4%, reduciéndose estas diferencias al hacerlo el ND y la S . Esto es debido a que con la utilización de balsa intermedia se pueden reducir los costes de operación en el bombeo al poder utilizar horas donde las tarifas electricas son mas baratas. Para $S = 70$ ha, la inclusión de balsa redujo los costes energéticos un 11% con $ND = 0$ m y un 7% para $ND = 200$ m. Además se reducen los costes de inversión (C_a , $\text{€ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) para las parcelas de mayor tamaño (Figura 4.4). Esto es debido al importante crecimiento del coste de la bomba con los

cables de alimentación en el bombeo directo respecto a la utilización de balsa intermedia.

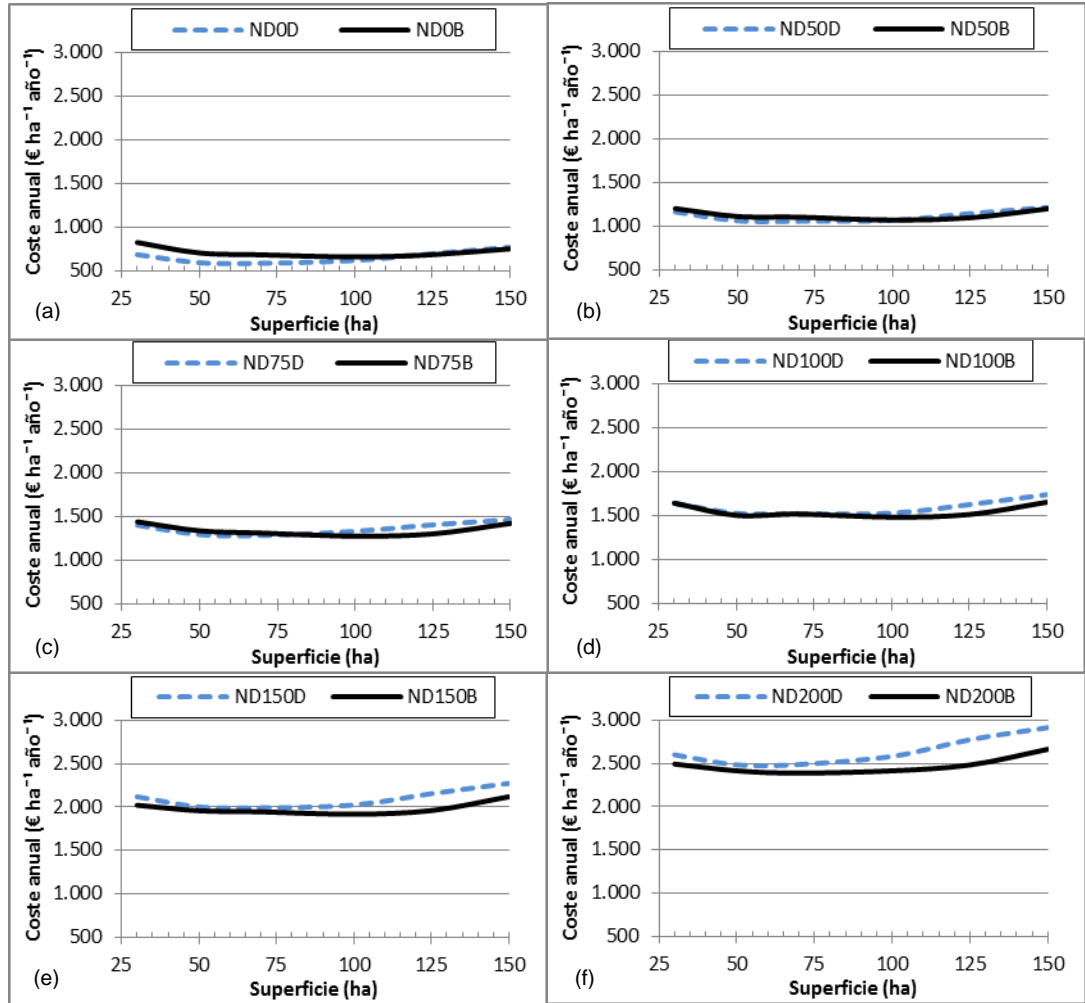


Figura 4.3. Comparación del C_T con sistema pívot bombeando directamente desde sondeo al pívot (*D*) y utilizando una balsa de regulación intermedia (*B*) para distintas superficies y niveles dinámicos de bombeo (*ND*) 0, 50, 75, 100, 150 y 200 m.

Los resultados (**Figura 4.3 d, e y f**), muestran una reducción del C_T (entre 0,01 y 10,55 %) al incluir balsas de regulación con $ND \geq 100$ m para todas las S evaluadas. Pulido-Calvo et al. (2006) consiguieron una reducción de C_e de 33% y C_T de 12% al evaluar el uso de balsas de regulación en sistema de riego a presión en la zona regable de Fuente Palmera.

Resulta de interés analizar el caso de $ND = 75$ m, que es donde empieza a producirse un cambio de C_T mínimo entre las opciones de bombeo directo y con balsa de regulación intermedia (**Figura 4.4**) para tamaños de pívot de 70 - 80 ha, que como se ha visto son los de menor coste. Así, para $S \leq 80$ ha, el C_T es mayor para la opción con balsa, debido principalmente al mayor coste de inversión (C_a) en la propia balsa. En cambio, para $S > 80$ ha, el C_T de la opción con balsa es menor que con bombeo directo, debido por una parte al gran incremento de costes energéticos en bombeo directo (C_{eD}) y por otra a la mayor reducción de costes de inversión por unidad de superficie en la opción con balsa.

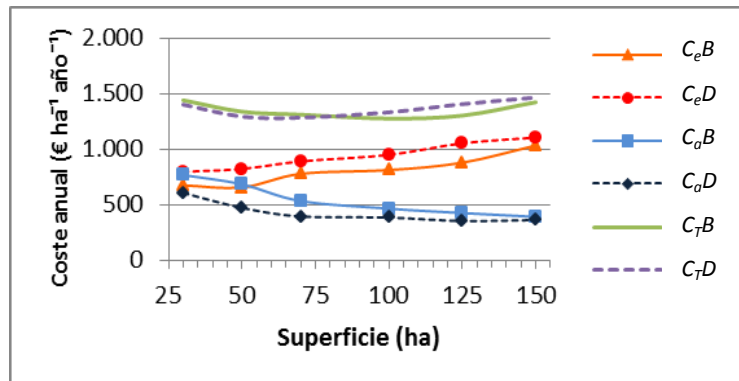


Figura 4.4. Descomposición del C_T para $ND = 75$ m, costes de inversión (C_a , incluido mantenimiento) y la energía (C_e), bombeando directamente desde sondeo al pívot (D) y utilizando una balsa de regulación intermedia (B), para distintas superficies regadas.

Entre 25 y 100 ha la diferencia de C_T con balsas intermedias y bombeo directo son pequeñas (<7,4%) (**Figura 4.4**). Queda pues a criterio del técnico la elección del sistema a implantar, teniendo en cuenta además que la opción de balsa intermedia presenta ventajas adicionales como: mayor nivel de garantía de suministro de agua al tener almacenado al menos el consumo de agua de un día, permitir el reparto de agua a diferentes presiones, sistemas y superficies de riego, así como la posibilidad de extraer el agua desde varias fuentes hasta la balsa. Otra ventaja importante es que con el uso de balsa las condiciones de trabajo del pívot son constante y no con inyección directa, ya que depende de la variación del nivel dinámico a lo largo de la campaña de riego.

De la **Figura 4.4** resulta también importante destacar la disminución de los costes de inversión y el crecimiento significativo de los costes de la energía al aumentar la S a regar, pasando de 57 a 75% cuando el tamaño del pívot pasa de 30 a 150 ha respectivamente y cómo el coste de energía con bombeo directo (C_{eD}) es mayor en hasta un 18,1% que con balsa intermedia (C_{eB}) en todas las superficies evaluadas. Este comportamiento se acentúa al crecer el ND de bombeo, lo que explica los resultados de la **Figura 4.3**.

El C_T mínimo para $ND = 75$ m (**Figura 4.4**) es para parcelas de 70 ha con bombeo directo desde sondeo, sin embargo las pequeñas variaciones de C_T (entre 25 y 100 ha), explica que este sea el intervalo de superficie normalmente utilizada en regiones como Castilla-La Mancha donde el ND está entre 70 y 100 m, y se utiliza normalmente la opción con balsa de regulación intermedia por las ventajas antes expuestas. La **Figura 4.2** también pone de manifiesto que cuando los precios de energía eran más baratos (situación del pasado en España), la opción de bombeo directo podría suponer menor C_T , pero sin las ventajas indicadas para la balsa de regulación intermedia, lo que hizo que fuera una solución poco utilizada.

4.4. COMPONENTES DEL COSTE DE EXTRACCIÓN DEL AGUA (C_w) Y DEL COSTE DE APLICACIÓN DEL AGUA DE RIEGO (C_A) CON EQUIPOS PÍVOT.

Los resultados de esta comparación se muestran en la **Figura 4.5**. Lo primero que llama la atención es el incremento del coste de energía en la extracción de agua (Fig. 4.5b) al aumentar el ND , llegando a estar por encima de los costes de inversión a partir de $ND = 35$ m, mientras que los costes de inversión por unidad de superficie regada decrecen ligeramente en los ND analizados (Figura 4.4).

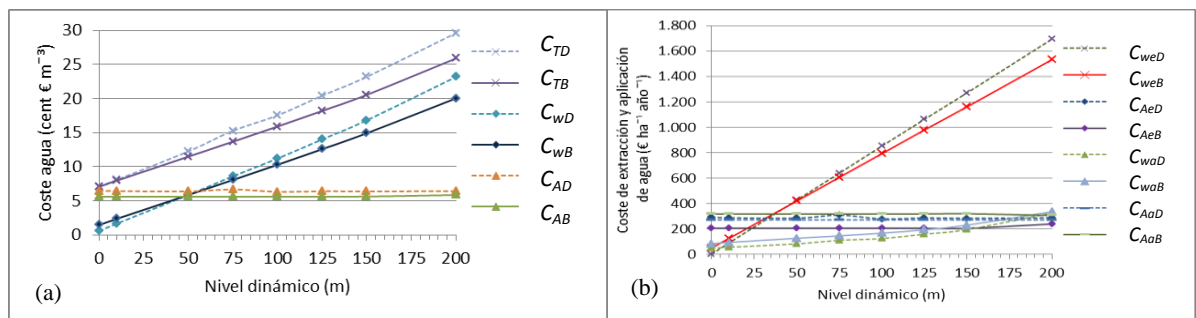


Figura 4.5. Descomposición del C_T para una superficie regada de 100 ha y distintos ND , en: (a) coste de extracción del agua (C_w) y coste de aplicación (C_A) para el caso de bombeo directo desde el sondeo al pívot (D) y balsa de regulación intermedia (B); y (b) descomposición del C_T en coste de inversión (i) y operación (o) para los casos anteriores.

Como era de esperar, los costes de aplicación del agua no dependen del ND , presentando valores muy similares para bombeo directo y con balsa de regulación, en torno a 6 cent €/m³ (Figura 4.5a).

Los costes totales de aplicación de agua con bombeo directo (C_{TD}) y con balsa de regulación intermedia (C_{TB}) son semejantes para $ND \leq 20$ m (Figura 4.5a), aumentando la diferencia entre ambos al aumentar el ND . Estas diferencias llegan

hasta un 15 % para $ND = 200\text{m}$, alcanzando valores de C_T de 30 y 26 cent € m^{-3} ; que son demasiado elevados para que puedan ser viables las explotaciones agraria de regadío en zonas dentro de las HS 08.29 de Castilla La Mancha, que admitirían un máximo de 12 a 18 cent € m^{-3} (Castillo, 1997).

Los costes de extracción de agua con bombeo directo (C_{weD}) tienden a aumentar con el ND en comparacion con los costes de extracción de agua con balsa de regulación intermedia (C_{weB}) llegando a ser 11% mayores que estos últimos para $ND = 200\text{ m}$, esta tendencia se debe principalmente a que el modelo DEPIRE al considerar la balsa intermedia puede hacer una mejor combinación entre consumos de potencia y energía al adaptar mejor los esquemas de bombeo según los periodos tarifarios. La inclusión de balsa permite al modelo mayor grado de libertad cuando realiza la optimización al poder usar el mayor número de horas valle y restringir el uso de horas llano y punta; situación que no ocurre con el modelo DOPW ya que está condicionado a adaptarse al tiempo optimo de riego que está entorno a las 18 horas y en este caso debe incluir horas llano que son 4,4 y 1,5 veces mas costosas que las horas valles en cuanto al acceso a la potencia y a la energía respectivamente.

4.5. DOTACIÓN ÓPTIMA Y OPERACIÓN DEL PÍVOT.

La dotación optima del pívot fué como media $1,50\text{ L s}^{-1}\text{ ha}^{-1}$ en todos los casos estudiados, con valores máximo $1,61\text{ L s}^{-1}\text{ ha}^{-1}$ y mínimo $1,46\text{ L s}^{-1}\text{ ha}^{-1}$. Estos valores de dotación relativamente altos vienen condicionados por el elevado coste de la energía, lo que conduce a bombear durante un máximo de 18 h día^{-1} y evitar las horas punta de coste energéticos que son 7,1 y 1,6 veces mas costosas que las horas valles en su acceso a la potencia y a la energía respectivamente, mientras que la S a regar y el ND tienen poca influencia sobre la dotación al equipo pívot.

Las necesidades de agua del cultivo de maíz en periodo punta fueron de $7,84\text{ mm día}^{-1}$, y las velocidades mínima del pívot para no tener problema de escorrentía

en un suelo de textura media para las superficies evaluadas fueron 1,9; 2,5; 2,9; 3,4; 3,7 y 4,2 m min⁻¹ para 30, 50, 70, 100, 125 y 150 ha respectivamente; lo que pone de manifiesto la utilidad de disponer de herramientas como DOPW y DEPIRE para el adecuado diseño y manejo del riego con equipos pívots.

4.6. VOLUMEN ÓPTIMO DE Balsa EN REDES COLECTIVAS DE RIEGO A LA DEMANDA (MODELO DRODN).

Cuando no se ponen restricciones en el caudal de extracción en sondeo (Q_a), el volumen útil de la balsa (V_u) fue en torno a un 20% superior con la metodología de estimación de la demanda de agua en la red de riego *RDDC* que con la L_m para los distintos *ND* estudiados (**Figura 4.6**), mientras que el volumen de regulación (V_r) fue normalmente inferior con la metodología *RDDC* que con la L_m (hasta un 20% inferior). Con ambas metodologías (L_m y *RDDC*), el V_r fue hasta un 45% mayor para $50 < ND < 150$ m que en el resto de los *NDs* (**Figura 4.6**). Estas diferencias se presentan también en el caudal óptimo de bombeo (extracción de agua del acuífero) como después se verá, repercutiendo en otros parámetros clave que condicionan la solución de mínimo C_T , estando relacionado con el coste de inversión en las bombas sumergidas al ser éste función de su potencia.

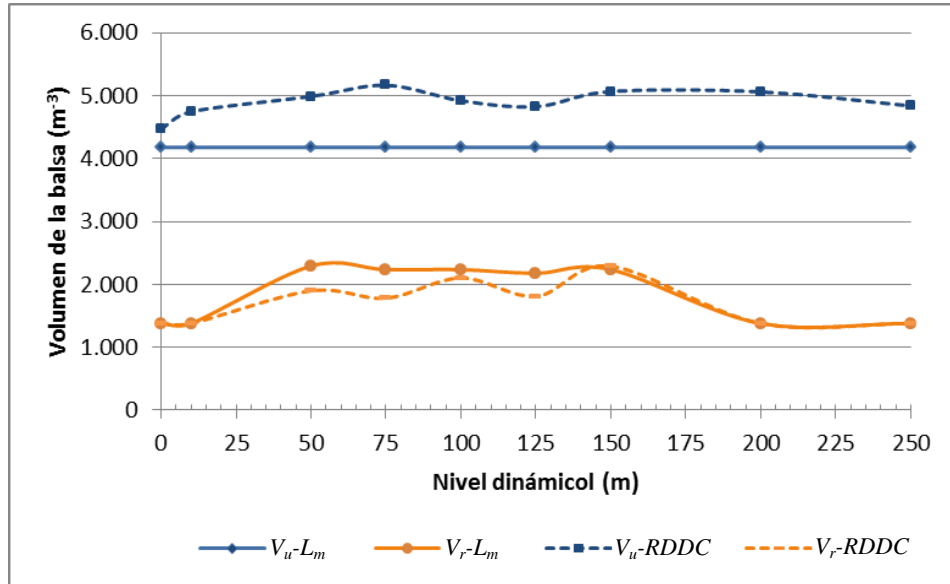


Figura 4.6. Volumen de balsa, útil (V_u) y mínimo (V_r) en la red de riego con las metodologías de L_m y de $RDDC$.

La balsa instalada en red de riego de la zona de estudio tiene un volumen total (V_T) de 20 000 m^3 y fue diseñada para más de 1 día de almacenamiento de agua demandada, así como para tener en cuenta las claras expectativas del crecimiento de la zona regable y un posible incremento de cultivos con mayor demanda de agua. El optimizador indica un V_u medio de la balsa entorno a los 5 000 m^3 , es decir 75% inferior al volumen diseñado. **Metha y Goto (1992)** destacan que el tamaño de balsa se ve afectado por el la disponibilidad de caudal en la fuente de agua, y la demanda de los cultivos, situaciones que se tuvieron en cuenta al diseñar la balsa en la red de riego analizada.

El algoritmo de cálculo genera menores valores de V_u con la metodología de L_m que con $RDDC$ debido a que el primero utiliza el valor medio del mes de mayor consumo de agua y el segundo utiliza caudales probabilísticos demandados por la red en los 10 días de máxima demanda de agua de los cultivo. Los menores V_r obtenidos en algunos casos con la metodología $RDDC$ se deben a que, al cambiar el caudal de

demanda de la red el proceso de optimización utiliza distintas combinaciones de variables y parámetros (potencia de bomba, horas de funcionamiento, volumen de balsa, etc.) para minimizar el C_T como después se verá (**Figs. 4.8 a 4.10**).

Esta metodología *RDDC* apoya lo señalado por Reca, et al. (2014) quienes sugieren el uso del periodo punta de demanda de agua de los cultivos para realizar el diseño y el programa de gestión del bombeo dado que en ese periodo son menores los grados de libertad en la toma de decisiones para el manejo de agua y la viabilidad del sistema de riego es más sensible en ese periodo. Además señalan que el aumento de los costes energéticos favorece el uso de balsas en cualquier sistema de riego ya que permite reducir los costes totales, principalmente en las condiciones semiáridas españolas, por lo que el tamaño resultante es bastante sensible a los costes de los periodos tarifarios y a las variaciones del precio de la energía.

4.7. COSTE TOTAL DE SUMINISTRO DE AGUA A UNA EN RED DE RIEGO A LA DEMANDA.

El C_T (€ ha⁻¹ año⁻¹), y por unidad de volumen bombeado (C_w , cent € m⁻³), crece linealmente con el ND (**Figura 4.7**), con un coeficiente de determinación (R^2) > 0,98; resultando ligeramente mayores costes con la metodología de demanda de agua de la red *RDDC* que con la L_m para todos los ND , aunque las mayores diferencias se encuentran en $ND < 50$ m y $ND > 150$ m, llegando hasta un 14,0% de incremento para $ND = 0$ m. La principal componente del C_T es la energía (C_e) (entre 57 y 80% del C_T) (**Figura 4.7**). Con ambas metodologías (L_m y *RDDC*) los C_e son los que originan el crecimiento sostenido del C_T ya que la inversión (C_a) experimentan un crecimiento pequeño hasta $ND = 150$ m, y se mantiene con pocas variaciones a partir de ese ND . Esto último es debido a que la solución óptima elige bombas de menor potencia (**Fig. 4.9a**) por lo que se reduce la inversión (C_a) (**Fig. 4.8b**) pero con mayor número de

horas de funcionamiento, y en consecuencia mayor coste energético (C_e) (**Fig. 4.8**) como se verá a continuación.

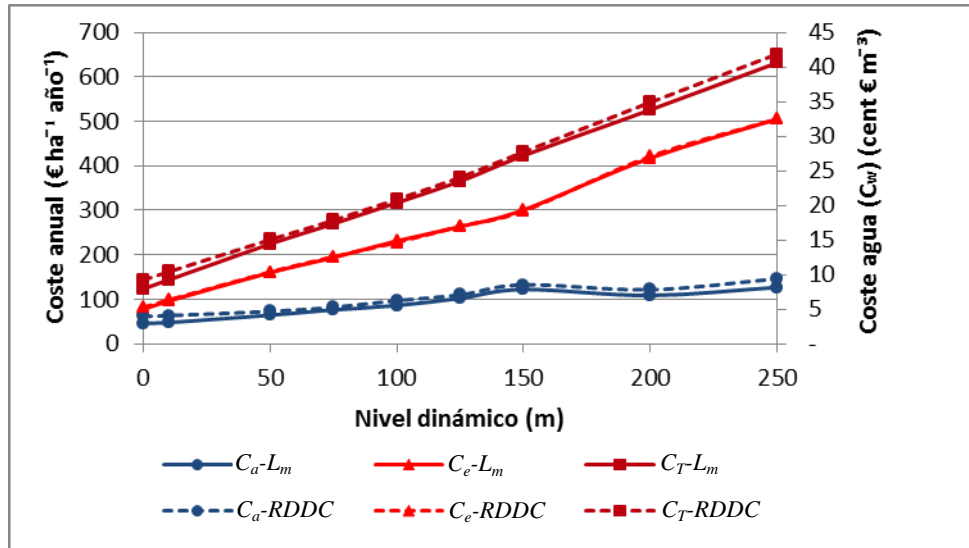


Figura 4.7. Variación del coste total de suministro de agua a la red de riego por unidad de área ($C_T \text{ € ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) y de volumen (C_w , cent € m^{-3}) en función del nivel dinámico (ND), con sus componentes de inversión (C_a) y de energía (C_e), para las metodologías de L_m y de $RDDC$.

Los valores de C_w aumentan desde 9,6 hasta 43,4 cent € m^{-3} para $ND = 0$ y 250 m respectivamente (**Figura 4.7**), y para la zona de estudio (HS 08.29) con ND entre 80 y 100 m el C_w está entre 18 y 21 cent € m^{-3} respectivamente con ambas metodologías de cálculo (L_m y $RDDC$) lo cual está en el límite de viabilidad económica para la mayor parte de las explotaciones agrícolas españolas (Castillo, 1997).

4.7.1. Costes de la extracción del agua (C_w) y el rebombeo a la red de riego (C_R).

Dado que el C_T es la suma de los costes de extracción del agua (C_w) y del rebombeo a la red de riego (C_R), en la **Figura 4.8** se muestra, para ambas metodologías de estimación de demanda de agua en la red, la variación de los componente de la energía (C_e) (**Fig. 4.8a**) y de la inversión (C_a) (**Fig. 4.8b**) para C_w y C_R . Como era de esperar los costes de inversión (C_{aR}) y de energía (C_{eR}) en el rebombeo a la red de riego experimentan escasas variaciones con el ND ($<16 \text{ € ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) (**Fig. 4.8**) al tener que suministrar una presión constante en cabecera de red (45 m en este estudio), donde no se han considerado las variaciones del nivel de agua en la balsa durante el periodo de funcionamiento.

La **Figura 4.8** pone de manifiesto que el incremento del C_T (**Fig. 4.5**) con el ND se debe fundamentalmente al proceso de extracción de agua del acuífero. En este sentido, un aspecto clave de los resultados, que solo es posible identificarlo con el uso de herramientas como DRODN, es que el crecimiento exponencial del coste de la bomba en función de la potencia hace que la solución de C_T mínimo conduzca a que para $ND > 150$ m se produzca una disminución de potencia y de caudal en la extracción de agua (**Fig. 4.9**), lo que supone una menor inversión (**Fig. 4.8b**), a costa de un mayor coste de energía (**Fig. 4.8a**), con mayor número de horas de funcionamiento (**Fig. 4.10**), dando lugar a un menor tamaño de balsa. El rebombeo se tiene que adecuar a ese tamaño de balsa, por lo que se ve obligado a aumentar el caudal (**Fig. 4.9b**) y la potencia (**Fig. 4.9a**), reduciéndose el número de horas de funcionamiento (**Fig. 4.8**) para mantener el mínimo C_T (**Fig. 4.7**). Esta es una ventaja de disponer de una herramienta de ayuda en la toma de decisiones como DRODN, al permitir identificar el cambios en la estrategia de optimización del C_T en función de los costes de inversión y de energía en cada país, pudiendo obtenerse soluciones muy distintas para los mismos sistemas de distribución y manejo del agua de riego según sea la relación entre los costes de inversión y los costes de acceso a la potencia y a la energía en sus distintos periodos tarifarios.

La **Figura 4.8** también pone de manifiesto que las diferencias en las componentes de energía (C_{ew}) e inversión (C_{aw}) en el proceso de extracción de agua son muy pequeñas para las dos metodologías de estimación de la demanda de agua de la red (L_m o $RDDC$) encontrándose diferencias que no sobrepasan el 3,6%. Situación era de esperar dado que los volúmenes a extraer del sondeo son iguales.

En el rebombado a la red, los costes de inversión (C_{aR}) son mayores con la metodología $RDDC$ en todos los casos analizados. La razón está en que la solución óptima debe elegir mayores caudales (en horas específicas del día) que con la metodología L_m (**Fig. 4.9b**), y por tanto mayor potencia de bombeo (**Fig. 4.9a**) con mayor inversión en bomba principalmente (C_{aR}).

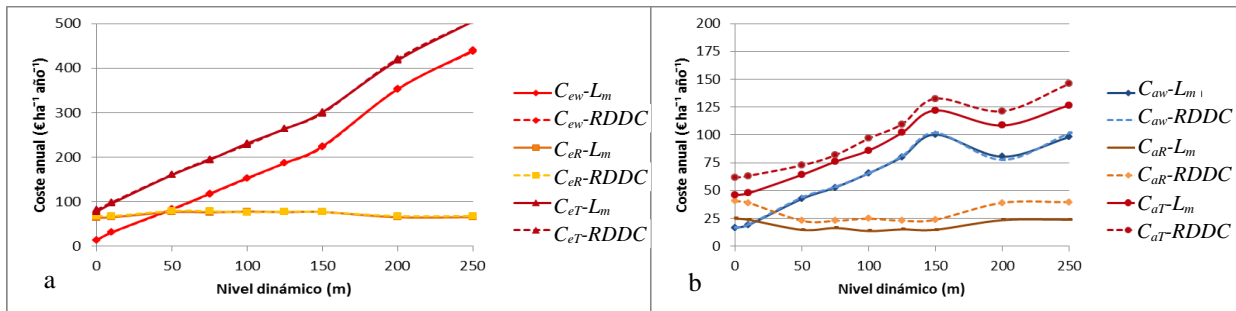


Figura 4.8. Coste anuales total (C_T , € ha⁻¹ año⁻¹), desglosados en a) costes energéticos (C_e) y b) costes de inversión (C_a), tanto en extracción de agua del sondeo (w) como en el rebombado a la red de riego (R) con las metodologías de L_m y de $RDDC$.

4.8. RELACIÓN ENTRE EL CAUDAL Y EL CONSUMO DE POTENCIA Y DE ENERGÍA EN LOS DISTINTOS PERIODOS TARIFARIOS.

En las **Figuras 4.9 y 4.10** se presenta la evolución, para distintos ND , de la potencia de bombeo que conduce al C_T mínimo (**Fig. 4.9a**), el caudal óptimo (**Fig.**

4.9b) y el número de horas de funcionamiento en los distintos periodos tarifarios (**Fig. 4.10**), tanto para la extracción de agua como para el rebombeo a la red de riego, con ambas metodologías de estimación de la demanda de agua de la red (L_m y $RDDC$). Los resultados ponen de manifiesto una clara interacción entre la extracción de agua y el rebombeo al estudiar ambos procesos de forma integrada con la herramienta DRODN, que no se identificaría si se analizan de forma independiente.

Con la metodología de estimación de la demanda de agua de la red L_m , el caudal óptimo de alimentación a la red (rebombeo) que conduce al C_T mínimo, se mantiene en torno a 65 L s^{-1} (**Fig. 4.9b**) para ND entre 50 y 150 m, con potencias en torno a 38 kW (**Fig. 4.9a**), y funcionando durante el mayor número de horas valle (alrededor a 924 h) y llano (entre 460 y 570 h) posible (**Fig.4.10a**). En cambio para $ND < 50 \text{ m}$ y $ND > 150 \text{ m}$ el caudal óptimo sube a unos 143 L s^{-1} (más del doble que el anterior), con potencias en torno a 85 kW (más del doble que la anterior), (**Fig. 4.9a**), funcionando solo en horas valle (en torno a 660 h), y sin llegar a utilizar todas las posibles (**Fig. 4.10a**). Para la metodología de $RDDC$ el comportamiento es parecido, dado que por la naturaleza de la metodología arroja que los caudales óptimos de alimentación a la red sean mayores (algo más de 115 L s^{-1} para ND entre 50 y 150 m y 278 L s^{-1} para $ND < 50 \text{ m}$ y $ND > 150 \text{ m}$), así como las potencias (entre 70 y 170 kW respectivamente para los intervalos de ND antes indicados), utilizando las horas valle (en torno a 750 h) y algunas pocas llano para ND entre 50 y 150 m, y solo una pocas horas valle (en torno a 340 h) para $ND < 50 \text{ m}$ y $ND > 150 \text{ m}$.

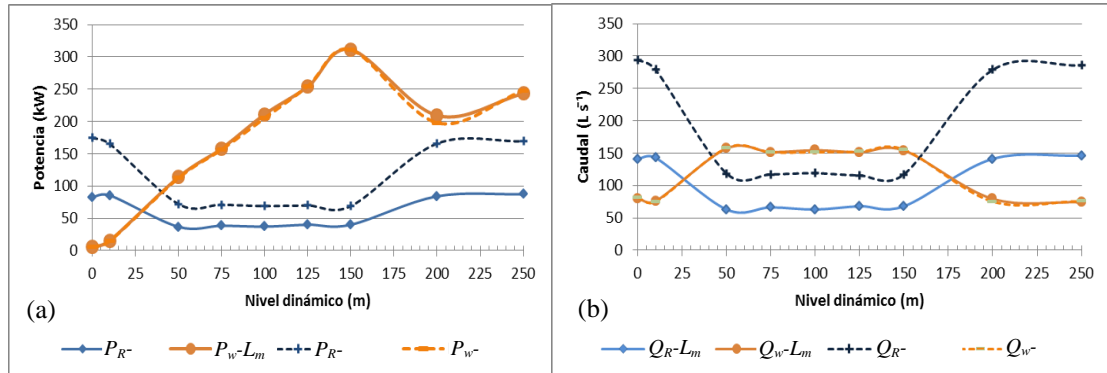


Figura 4.9. Potencia de bomba consumida en la extracción de agua (P_w) y en el rebombeo a la red de riego (P_R) y caudal óptimo en la extracción (Q_w) y en la red (Q_R) con las metodologías de L_m (a) y de $RDDC$ (b).

En el proceso de extracción de agua los resultados con ambas metodologías de estimación de la demanda de la red (L_m y $RDDC$) son semejantes, con diferencias de caudales y presión entre ambas menores a 5%, y diferencias en horas totales consumidas menores al 2% (Figs. 4.9 y 4.10). La causa principal es que con ambas metodologías las necesidades de agua anuales en su conjunto son iguales, siendo el componente diferenciador la forma en que se consume durante la campaña de riego, estando ésta influenciada por el tipo de metodología de cálculo de demanda de agua de la red.

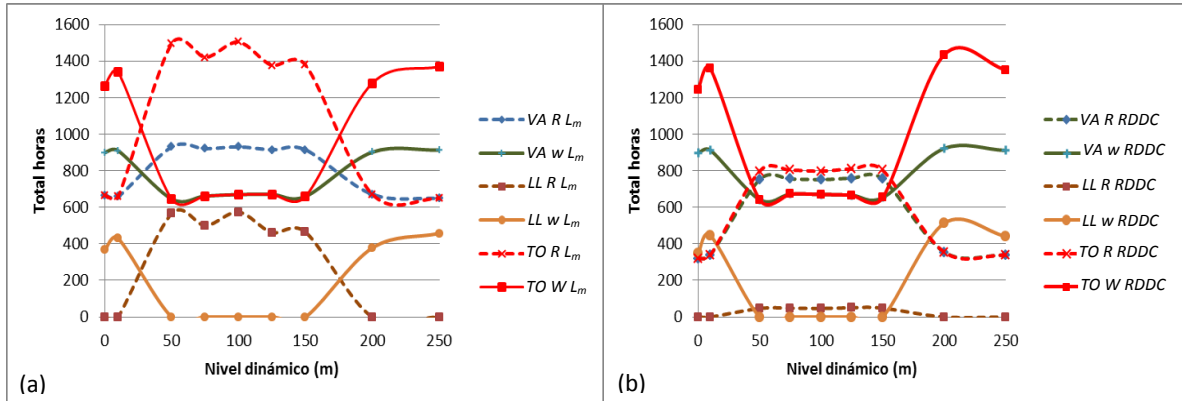


Figura 4.10. Horas consumidas en valle (VA), llano (LL) y total (TO), en la extracción de agua (w) y el bombeo a la red de riego (R), a) con la metodología de L_m , y b) con la de $RDDC$.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Disponer de herramientas como DOPW, DEPIRE y DRODN resulta fundamental para la ayuda en la toma de decisiones en el proceso de modernización de regadíos con sistemas de riego a presión y elegir la forma de manejo del agua al contemplar con una visión holística el proceso de extracción y abastecimiento de agua a la red de distribución, identificando el tipo de bomba, los caudales de bombeo y las condiciones de trabajo del sistema que conducen al mínimo coste total C_T , teniendo en cuenta los costes de la energía en los distintos periodos tarifarios.

El coste energético (C_e) es el componente más importante del coste total (C_T), tanto en la extracción como en el suministro de agua a la red de riego, aumentando con el nivel dinámico del agua en el sondeo (ND). El C_e representó al menos el 32% de los C_T en todos los casos estudiados y modelos estudiados, llegando en algunos casos al 80%. El precio de la energía es pues uno de los factores más importantes a tener en cuenta al poner en marcha cualquier proyecto de riego a presión bajo las condiciones tarifarias de acceso a la energía y potencia en España.

La superficie regada con equipos pivots que representó los menores C_T en los casos estudiados fue 70 y 100 ha con el bombeo directo (modelo DOPW) y balsa intermedia (modelo DEPIRE) respectivamente para $ND \geq 100$ m.

La combinación de los resultados de los modelos DOPW y DEPIRE pone de manifiesto que la incorporación de balsas de regulación intermedia, que genera menores C_T que la alimentación directa al equipo pivot a partir de $S > 100$ ha, aumentando las diferencias de costes al incrementarse el ND . Aunque a veces la inclusión de balsa no es la mejor solución desde el punto de vista económico ya que los costes de inversión pueden resultar superiores al ahorro que implica su inclusión, las ventajas adicionales de la balsa en caso de avería en el sondeo al almacenar el consumo de agua de un día, el poder utilizar varios sondeos para abastecer a la balsa,

o el poder bombear desde la balsa a varios sistemas de riego con diferentes necesidades de caudal y presión, aumentan el interés de la solución con balsa.

En el coste de extracción de agua (C_w), el coste más importante es el energético para $ND > 30$ y $ND \geq 0$ m para el caso de riego con equipos pívot y abastecimiento a redes de riego a la demanda respectivamente, llegando a ser más de cinco veces superior al coste de inversión para $ND = 250$ m. Por el contrario, en el coste de aplicación del agua con equipos pívot (C_A) y en el de entrega de agua a la red colectiva de riego (C_R), la componente de inversión es más importante que la componente de energía.

El volumen óptimo de la balsa de regulación necesaria para abastecer una red de riego a la demanda utilizando el método de las curvas aleatorias de demanda diaria (*RDDC*) es mayor que con la metodología de la demanda media de los cultivos (L_m) dado que utiliza mayores concentraciones de caudales de demanda de agua por la red que con el uso de L_m , siendo además una mejor estimación del funcionamiento real de la red de riego.

Este estudio sobre uso eficiente del agua y la energía en sistemas de riego ha puesto de manifiesto la necesidad de evaluar en investigaciones futuras; a) la susceptibilidad de los diámetros de tubería a las variaciones de tarifas eléctricas y su efecto sobre los costes energéticos, b) valorar la distancia óptima de ubicación óptima de balsas tanto horizontal como vertical que permitan un mayor ahorro energético, manejo y operación de sistemas de riego, c) contrastar los costes de sistemas de riego de aspersión fijo versus aspersión con laterales móviles sobre el ahorro económico y energético bajo diferentes escenarios de costes a nivel mundial, y d) evaluar el efecto de la configuración y tamaño de parcelas y sus impactos sobre el ahorro de agua y energía.

6. BIBLIOGRAFÍA.

- Abreu, J. M., Camarasa, J., & Iglesias P. (1992). Los depósitos en los sistemas de abastecimiento. Curso de Ingeniería Hidráulica aplicada a los Sistemas de Distribución de Agua. Universidad Politécnica de Valencia, Dpto. Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Tomo II, Capítulo 16.
- Allen, R. G. (1989). USUPIVOT: Centre Pivot Nozzle Selection Computer Software User's Manual. Department Biological and Irrigation Engineering, Utah State University, Logan, Utah.
- Allen, R. G. (1991). USUPIVOT: Centre Pivot and Linear Move Nozzle Selection Program. User's Manual. Department Biological and Irrigation Engineering. Utah State University, Logan, Utah.
- Allen, R. G., Keller, J., & Martin, D. (2000). Centre pivot system design. The Irrigation Association VA, USA. Disponible en <http://www.irrigation.org>.
- Allen, R. G., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo. Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. En Estudio FAO: Riego y Drenaje 56. FAO: Roma, Italia.
- Amigó, E., & Aguiar, E. (1994). Manual para el diseño, construcción y explotación de embalses impermeabilizados con geomembranas. Madrid, España: Dirección General de Estructuras Agrarias, Consejería de Agricultura y Alimentación, Gobierno de Canarias.
- Andrade, C. L. T., & Allen, R. G. (1997). SPRINKMOD–Sprinkler Simulation Model User's Manual. Uthah State University (USA) y EMBRAPA (Brazil). Disponible en <http://www.usu.com>.
- Brennan, D. (2008). Factors affecting the economic benefits of sprinkler uniformity and their implications for irrigation water use. *Irrigation Science*, 26, 109–119.
- Bierschenk, W. (1963). Determining well efficiency by multiple stepdrawdown tests. *International Association of Scientific Hydrology*, 64, 493–507.

- Calejo, M. J., Lamaddalena, N., Teixeira, J. L., & Pereira, L. S. (2008). Performance analysis of pressurized irrigation systems operating on demand using flow-driven simulation modeling. *Agricultural Water Management*, 95, 154-162
- Carrillo, M. T., Camacho, E., & Rodriguez, J.A. (2014). Autoabastecimiento energético como alternativa para las comunidades de regantes. 1^{er} Congreso Nacional de Riegos Modernizados. *Tierras Agricultura*, 218, 98-101.
- Carrión, F., Montero, J., Tarjuelo, J. M., & Moreno, M. A. (2014). Design of Sprinkler Irrigation Subunit of Minimum Cost with Proper Operation. Application at Corn Crop in Spain. *Water Resources Management*, 28, 5073–5089.
- Carrión, F., Tarjuelo, J. M., Carrión, P., & Moreno, M. A. (2013). Low-cost microirrigation system supplied by groundwater: An application to pepper and vineyard crops in Spain. *Agricultural Water Management*, 127, 107– 118.
- Castillo, H. (1997). La importancia de las disponibilidades de agua para regadío en diferentes áreas de cultivo. *Riegos y Drenajes XXI*, 94, 31–40.
- CAMB. (1986). *Balsas y embalses para riego*. Barcelona, España: Generalitat de Catalunya, Diputació de Tarragona y Solvay Láminas Industriales, S.A. Centre Agropecuari "Mas Bové".
- CHJ. (2014). *Plan Hidrológico de cuenca 2009-2015*. Madrid, España: Confederación Hidrográfica del Júcar. Disponible en <http://www.chj.es>.
- Clément, R. (1966). Calcul des débits dans le réseaux d'irrigation fonctionnant á la demande. *La Houille Blanche*, 5, 553–575 (in French).
- Clément, R., & Galand, A. (1986). *El riego por aspersion y las redes colectivas de distribución a presión*. Barcelona, España: Editores Técnicos Asociados.
- CNEGP. (2010). *Manual para el diseño, construcción, explotación y mantenimiento de balsas*. Madrid, España: Ministerio de medio ambiente y medio rural y marino, Comité Nacional Español de Grandes Presas.
- COM. (2014). *Energy prices and costs in Europe*. Communication from the commission to the European parliament, the council, the European economic and

- social committee and the committee of the regions. Bruselas, Bélgica: European Commission. Disponible en <http://ec.europa.eu>.
- Conte, S. D., & Boor, C. (1974). La solución de ecuaciones no lineales. Análisis numérico elemental, un enfoque algorítmico (2nd ed.). México: McGraw-Hill.
- Doorenbos J. & Pruitt, W. O. (1977). Las necesidades de agua de los cultivos, Estudio FAO: Riego y Drenaje 24, FAO: Roma, Italia.
- Ederra, I. & Murugaren, N. (2010). La nueva tarifa eléctrica, la escalada de precios del agua de riego. Riegos de Navarra S.A. Servicio de asesoramiento al regante. Disponible en: <http://www.riegosdenavarra.com/publica/TarifasElectricas020310.pdf>.
- Edwards, D. R., Fergunson, J. A., & Fryar, E. O. (1992). Analyzing conjunctive use reservoir performance for soybean irrigation. I: Development of a simulation model. Transactions of the ASABE, 35(1), 129-135.
- EIA. (2013). International Energy Outlook 2013. Washington, D.C.: U.S. Energy Information Administration. Disponible en <http://www.eia.gov/ieo/>.
- ESYRCE. (2008). Encuesta de Superficies y Rendimientos de Cultivos en España. Madrid, España: Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino (MARM).
- ESYRCE. (2013). Encuesta de Superficies y Rendimientos de Cultivos en España. Madrid, España: Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino (MARM).
- Giscosa. (1995). Todo sobre la impermeabilización de embalses con geomembranas sintéticas. Impermeabilización profesional, 7, 61-78.
- Hantush, M. S. (1964). Hydraulics of wells. Advances in Hydrosience, 1, 281– 442.
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. Applied Engineering in Agriculture, 1(2), 96–99.
- Hirose, S. (1997). Determination of the capacity of a regulating pond in a pipeline irrigation system. Rural and Environmental Engineering, 33, 66-78.

- IDAE. (2008). Ahorro y eficiencia energética en las Comunidades de Regantes. Madrid, España: Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.
- IDAE. (2011). Plan de Acción de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020. Madrid, España: Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.
- IGME. (1980). El Sistema Hidrogeológico de Albacete (Mancha Orienta): Sus recursos de agua subterránea, utilización actual y posibilidades futuras. Instituto Geológico y Minero de España. Disponible en: http://agua.igme.es/igme/publica/libros1_HR/libro60/lib60.htm.
- Jacob, C. E. (1947). Drawdown test to determine effective radius of artesian well. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 112(2312), 1047–1070.
- JCRMO. (2012). Inventario de regadíos de la JCRMO. Madrid, España: Memorias anuales del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Disponible en: <http://www.jcrmo.org/index.php?id=38>.
- Jensen, M. E., Burman, R. D., & Allen, R. G. (1990). *Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements*. New York, NY., USA: ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70, American Society Civil Engineer.
- Jeppson, R. W. (1977). *Analysis of flow in pipe network*. Michigan, USA: Ann Arbor Science, Ann Arbor.
- Jowitt, P. W., & Germanopoulos, G. (1992). Optimal pump scheduling in water-supply networks. *Journal Water Resources. Planning and Management*, 118(4), 406-422.
- Keller, J., & Bliesner, R. D. (1990). *Sprinkle and trickle irrigation*. New York, NY, USA: AVI Book, Van Nostrand Reinhold.
- Kranz, W. L., Eisenhauer, D. E., & Retka, M. T. (1992). Water and energy conservation using irrigation scheduling with center-pivot irrigation systems. *Agricultural Water Management*, 22(4), 325–334.

- Labye, Y., Olson, M. A., Galand, A., & Tsourtis, N. (1988). Design and optimisation of irrigation distribution network. Rome, Italy: Irrigation and Drainage Paper 44, Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO).
- Lamaddalena, N. (1997). Integrated simulation modeling for design and performance analysis of on-demand pressurized irrigation systems. Ph.D. Dissertation, Universidad Técnica de Lisboa, Instituto Superior de Agronomía, Lisboa, Portugal.
- Lamaddalena, N., & Khila, S. (2012). Energy saving with variable speed pumps in on-demand irrigation systems. *Irrigation Science*, 30(2), 157-166.
- Lamaddalena, N., & Sagardoy, J. A. (2000). Performance analysis of on-demand pressurized irrigation systems. Roma, Italy: Procedure FAO, Irrigation and Drainage.
- Lansley, K. E., & Mays, L. W. (1989). Optimization model for water distribution system design. *Journal of Hydraulic Engineering*, 115(10), 1401–1418.
- López-Luque, R., Reca, J., & Roldán, J. (1993). Algoritmo de selección y gestión de tarifas de energía eléctrica en los sistemas de impulsión de agua. Valladolid, España: Actas de las XI Jornadas Técnicas sobre Riegos, 323-328.
- Losada, A. (1995). Bombas y sistemas de impulsión. El riego. Fundamentos hidráulicos. Barcelona, España: ediciones Mundi-Prensa, XII, 251-292.
- MAGRAMA. (2000). Plan Nacional de Regadíos - Horizonte 2008. Madrid, Spain: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Disponible en <http://www.magrama.gob.es>.
- Mantovani, C. E., Berengena, J., Villalobos, F. J., Orgaz, F., & Fereres, E. (1991). Medidas y estimaciones de la evapotranspiración real del trigo de regadío en Córdoba. Granada, España: Actas IX Jornadas Técnicas de Riego.
- Martínez-Álvarez, V., González-Real, M. M., Baille, A., Maestre-Valero, J. F., & Gallego-Elvira, B. (2008). Regional assessment of evaporation from agricultural irrigation reservoirs in a semiarid climate. *Agricultural Water Management*, 95, 1056–1066.

- Martínez-Granados, D., Maestre-Valero, J. F., Calatrava, J., & Martínez-Alvarez, V. (2011). The economic impact of water evaporation losses from water reservoirs in the Segura Basin, SE Spain. *Water Resource Management*, 25, 3153–3175.
- Mavropoulos, T. I. (1997). Sviluppo di una nuova formula per il calcolo delle portate di punta nelle reti irrigue con esercizio alla domanda. *Rivista di Irrigazione e Drenaggio*, 44(2), 27–35 (in Italian).
- Medina, J. L., López-Luque, R., Camacho, E., Reca, J., & Roldán, J. (1997). Dimensionamiento óptimo de una balsa de acumulación de agua para su uso en riego localizado. Lleida, España: Actas del XV Congreso Nacional de Riegos, 437-444.
- Mehta, B. K., & Goto, A. (1992). Design and operation of on-farm irrigation ponds. *Journal Irrigation and Drainage Engineering*, 118(5), 659-673.
- Merriam, J. L., y Keller, J. (1983). *Farm Irrigation Systems Evaluation. A Guide for Management*. Utah State University, Logan, Utah.
- Molina, J. M. (2004). Caracterización y modelización de la evaporación en tanques evaporímetros y embalses de riego. Evaluación de los efectos de mallas de sombreado. Tesis Doctoral, Universidad Politecnica de Cartagena, España.
- Montero, A., Martínez, M., Valiente, M., Moreno, M. A., & Tarjuelo, J. M. (2012). Analysis of water application costs with a center pivot system for irrigation of crops in Spain. *Irrigation Science*, 31(3), 507-521.
- Moradi-Jalal**, M., Mariño, M. A., & Afshar, A. (2003). Optimal Design and Operation of Irrigation Pumping Stations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(3), 149-154.
- Moradi-Jalal, M., Rodin, S. I., & Mariño, M. A. (2004). Use of Genetic Algorithm in Optimization of Irrigation Pumping Stations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 130(5), 357-365.
- Moradi-Jalal, M., & Karney, B. W. (2008). Optimal design and operation of irrigation pumping stations using mathematical programming and Genetic Algorithm (GA). *Journal of Hydraulic Research*, 46(2), 237-246.

- Moreno, M. A. (2005). Análisis hidráulico y energético de redes de riego a la demanda. Tesis Doctoral, Centro Regional de Estudios del Agua, Universidad de Castilla-La Mancha, España.
- Moreno, M. A., Carrión, P., Planells, P., Ortega, J. F., & Tarjuelo, J. M. (2007a). Measurement and improvement of the energy efficiency at pumping stations. *Biosystems Engineering*, 98(4), 479–486.
- Moreno, M. A., Córcoles, J. I., Moraleda, D. A., Martínez, A., & Tarjuelo, J. M. (2010). Optimization of Underground Water Pumping. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 136(6), 414-420.
- Moreno, M. A., Medina, D., Ortega, J. F., & Tarjuelo, J. M. (2012). Optimal design of center pivot systems with water supplied from wells. *Agricultural Water Management*, 107, 112-121.
- Moreno, M. A., Planells, P., Córcoles, J. I., Tarjuelo, J. M. & Carrión, P. A. (2009). Development of a new methodology to obtain the characteristic pump curves that minimize the total cost at pumping stations. *Biosystems Engineering*, 102, 95-105.
- Moreno, M. A., Planells, P., Ortega, J. F., & Tarjuelo, J. M. (2007b). New methodology to evaluate flow rates in on-demand irrigation networks. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering (ASCE)*, 133(4), 298–306.
- Nelder, J. A., & Mead, R. (1965). A simplex method for function minimization. *Computer Journal*, 7(4), 308–313.
- Ortiz, J. N., de Juan, J. A., & Tarjuelo, J. M. (2010). Analysis of water application uniformity in a centre-pivot and its effect on sugar beet (*Beta vulgaris L.*) yield. *Biosystems Engineering*, 105(3), 367-379.
- Ortiz, J. N., Tarjuelo, J. M., & de Juan, J. A. (2009). Characterisation of evaporation and drift losses with centre-pivots. *Agriculture Water Management*, 96, 1541-1546.

- Planells, P., Carrión, P., Ortega, J. F., Moreno, M. A., & Tarjuelo, J. M. (2005). Pumping selection and regulation for water distribution networks. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(3), 273–281.
- Planells, P., Tarjuelo, J. M., Ortega, J. F., & Casanova, M. I. (2001). Design of water distribution networks for on-demand irrigation. *Irrigation Science*, 20, 189–2001.
- Pulido-Calvo, I. (2001). Diseño y gestión óptimos de sistemas de impulsión y de almacenamiento de agua para riego. Tesis doctoral, Universidad de Córdoba, España.
- Pulido-Calvo, I., Gutiérrez-Estrada, J. C., & Corbacho, J. M. (2008). Pipes size selection of water distribution systems of fishfarms. *Aquacultural Engineering*, 39, 43-52.
- Pulido-Calvo, I., Gutiérrez-Estrada, J. C., López-Luque, R., & Roldán, J. (2006). Regulating reservoirs in pressurized irrigation water supply systems. *Journal of Water Supply: Research and Technology–Aqua*, 55(5), 367–381.
- Pulido-Calvo, I., & Gutiérrez-Estrada, J. C. (2011). Selection and operation of pumping stations of water distribution systems. *Environmental Research Journal*, 5(1), 49-72.
- Pulido-Calvo, I., López, R., & Roldan, J. (1998). Caracterización horaria y estacional de la demanda en una red de distribución de agua para riego. Palma de Mallorca, España: Proc., XVI Congreso Nacional de Riegos.
- Pulido-Calvo, I., Roldán, J., López-Luque R., & Gutierrez-Estrada, J. C. (2003). Water delivery planning considering irrigation simultaneity. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(4), 247–255.
- Reca, J., García-Manzano, A., & Martínez, J. (2014). Optimal pumping scheduling model considering reservoir evaporation. *Agricultural Water Manage*, 148, 250-257.
- Roy, D. N. (1988). *Applied fluid mechanics*. New York, N.Y. USA: Ed. Ellis Horwood Ltd.

- Sabet, M. H., & Helweg, O. J. (1989). Peaking storage tanks for water supply systems. *Water Resources Bulletin*, 25(5), 1047-1053.
- Sanz, D. (2005). Contribución a la caracterización geométrica de las unidades hidrogeológicas que integran el sistema de acuíferos de la mancha oriental. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid, España.
- Scherer, T., & Weigel, J. (1993). Planning to irrigate. NDSU extension service. North Dakota State University. Disponible en <http://www.ext.nodak.edu/extpubs/ageng/-irrigate/ae91w.htm>.
- Schroeder, M. A., & Fischbach, P. E. (1983). Improving the efficiency of irrigation pumping plants. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI. USA.
- Schoups, G., Addams, L., Minjares J. L., & Gorelick S. (2006). Reliable conjunctive use rules for sustainable irrigated agriculture and reservoir spill control. *Water Resources Research*, 42, 1-15. Disponible en doi:10.1029/2006WR005007.
- SIAR. (2015). Servicio Integral de Asesoramiento al Regante en Castilla La Mancha. Disponible en: <http://crea.uclm.es/siar/>.
- Tarjuelo, J. M. (2005). El riego por aspersión y su tecnología (3rd Ed.). Madrid, España: Ediciones Mundi-Prensa.
- Tarjuelo, J. M., Montero, J., Carrión P. A., Honrubia F. T., & Calvo M. A. (1999). Irrigation Uniformity with Medium Size Sprinklers. Part II. Influence of wind and other factors on water distribution. *Trans ASAE*, 42(3), 677-689
- Valín, M. I., Cameira, M. R., Teodoro, P. R., & Pereira, L. S. (2012). DEPIVOT: A model for center-pivot design and evaluation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 87, 159-170. Disponible <http://www.elsevier.com/locate/compag>.

7. ANEJOS

7.1. GLOSARIO DE TÉRMINOS Y SÍMBOLOS

a	= fracción de área bien regada (decimal)
A	= anualidad de la inversión (€ T^{-1})
Alm	= almacenamiento de agua en el suelo (L)
APH	= aporte potencial horario (L^{-3})
AS	= capacidad de almacenamiento superficial del suelo (L)
c	= coeficientes de la curva característica de la bomba
C	= coeficiente de fricción de tubería de acero
C'	= coeficiente de fricción tubería del pívot
Ca	= coste de arrancador electrónico (€ ud^{-1})
C_a	= costes totales anuales de inversión por unidad de área ($\text{€ L}^{-2} \text{T}^{-1}$)
C_A	= coste de aplicación del agua de riego (€ L^{-3})
C_{Aa}	= coste anual de inversión en la aplicación del agua (€ L^{-3})
C_{Ae}	= coste anual de energía en la aplicación del agua (€ L^{-3})
C_{AD}	= coste de llevar el agua desde salida del sondeo a superficie de riego (€ L^{-3})
C_{AB}	= coste de llevar el agua desde balsa a superficie de riego (€ L^{-3})
C_{aP}	= coste anual de transportar el agua desde sondeo hasta la balsa ($\text{€ L}^{-2} \text{T}^{-1}$)
C_{aR}	= coste anual para suministro de agua a la red ($\text{€ L}^{-2} \text{T}^{-1}$)
c_B	= coeficientes de la curva característica de la bomba en rebombeo
Cc	= coste de cableado de alimentación de bombas y equipo pívot (€ L^{-1})
Cce	= coste de cuadro eléctrico (€ ud^{-1})
C_e	= costes totales anuales de operación por unidad de área ($\text{€ L}^{-2} \text{T}^{-1}$)
C_{ew}	= coste anual de operación de llevar el agua desde fuente a balsa ($\text{€ L}^{-2} \text{T}^{-1}$)
C_{eR}	= coste anual de operación para suministro de agua a la red ($\text{€ L}^{-2} \text{T}^{-1}$)
CF	= coeficiente de compactación en los movimientos de tierra (decimal)
C_i	= coste anual de inversión (€ T^{-1})
C_m	= costes totales anuales de mantenimiento por unidad de área ($\text{€ L}^{-2} \text{T}^{-1}$)

C_{op}	= costes operacionales anuales (€ T^{-1})
CRF	= factor de recuperación del capital (decimal)
C_p	= coste del grupo motor-bomba (€)
C_{pd}	= coste de la tubería de distribución (€ L^{-1})
C_{pi}	= coste de la tubería de impulsión (€ L^{-1})
C_{pp}	= coste tubería del equipo pívot (€ L^{-1})
C_R	= coste de agua para alimentación a la red de riego (€ L^{-3})
C_t	= coste de transformador (€ ud^{-1})
C_T	= costes totales anuales de aplicación de agua por unidad de área ($\text{€ L}^{-2} \text{T}^{-1}$)
C_{TB}	= coste total anual de aplicación de agua con balsa de regulación ($\text{€ L}^{-2} \text{T}^{-1}$)
C_{TD}	= coste total anual de aplicación de agua en bombeo directo ($\text{€ L}^{-2} \text{T}^{-1}$)
C_{tr}	= coste del equipo pívot sin tubería (€)
CU	= coeficiente de uniformidad de aplicación agua en el suelo (decimal)
C_v	= coste de válvula hidráulica (€ ud^{-1})
CV	= coeficiente de variación (porcentaje)
c_w	= coeficientes de la curva característica de la bomba en sondeo
C_w	= costes de extracción del agua (€ L^{-3})
C_{wa}	= coste anual de inversión en la extracción del agua (€ L^{-3})
C_{wB}	= costes de extracción de agua a la balsa (€ L^{-3})
C_{wD}	= costes de extracción de agua a la salida del sondeo (€ L^{-3})
C_{we}	= coste anual de energía en la extracción del agua (€ L^{-3})
d	= dotación del hidrante ($\text{L}^3 \text{T}^{-1}$)
D	= diámetro de tubería (L)
D_{ba}	= altura total de agua aplicada en un riego (L)
Dem	= demanda de agua del sistema de riego (L^3)
D_d	= diámetro interno de tubería de distribución (L)
D_{dp}	= diámetro de tubería de distribución al pívot (L)
D_{dR}	= diámetro de tubería de distribución a la red (L)
D_{dw}	= diámetro de tubería de distribución en sondeo (L)

D_i	= diámetro interno de tubería de impulsión (L)
d_i	= demanda de la red de riego en cada instante (L^{-3})
D_{ip}	= diámetro de tubería de impulsión al pivot (L)
D_{iR}	= diámetro de tubería de impulsión a la red (L)
D_{iw}	= diámetro de la tubería de impulsión en sondeo (L)
D_o	= altura de lámina de agua aplicad al terreno en un tiempo (L)
D_p	= diámetro interno de la tubería del pivot (L)
e	= tasa anual de incremento de costes de energía (porcentaje)
E_a	= eficiencia de riego (porcentaje)
E_b	= pérdidas por evaporación en la balsa (porcentaje)
EDa	= eficiencia de distribución del agua de riego (porcentaje)
ETc	= evapotranspiración del cultivo ($L T^{-1}$)
Ev	= pérdidas de agua por evaporación desde la superficie libre de la balsa (L)
F	= resguardo entre la altura de la balsa y la del agua (L)
H	= altura de bombeo (L)
$H1$	= profundidad de excavación a partir de la superficie original del terreno (L)
$H2$	= diferencia entre la altura del agua y la profundidad de la excavación (L)
H_{asp}	= altura del aspersor sobre el suelo (L)
H_e	= presión de operación del aspersor del pivot (L)
Hg	= diferencia de cota entre la fuente y el punto de entrega de agua (L)
hQ^2	= pérdidas de carga en las tuberías (L)
h_r	=pérdidas de carga por fricción en las tuberías (L)
H_R	= altura de presión en rebombeo a la red de riego (L)
h_{rds}	= pérdida de carga por fricción en la tubería de distribución a la balsa (L)
h_{rdp}	= pérdida de carga por fricción en la tubería de distribución al pivot (L)
h_{ris}	= pérdida de carga por fricción en la tubería de impulsión en el sondeo (L)
h_{rp}	= pérdida de carga por fricción en la tubería lateral del pivot (L)
H_T	= altura total de bombeo (L)
H_{Ts}	= altura de bombeo en sondeo (L)

H_{Tp}	= altura de rebombeo al pivot (L)
H_U	= horas usadas en el bombeo desde el sondeo (T)
H_{UB}	= horas usadas en el rebombeo desde la balsa (T)
i	= velocidad de infiltración ($L T^{-1}$)
K y n	= coeficientes experimentales de ajuste de la ecuación de infiltración
I_r	= intervalo de riego (T)
L	= la longitud del lado de la base de la balsa (L)
L_d	= lámina de agua para el lavado de sales (L)
L_d	= longitud de tubería de distribución a la balsa (L)
L_i	= longitud de tubería de impulsión (L)
L_m	= método de las necesidades medias mensual de agua de los cultivos
L_t	= distancia del punto pivote a la última torre (L)
NE	= intervalo de optimización (T)
N_d	= número de días necesarios para regar una parcela (T)
ND	= nivel dinámico (L)
N_n	= cantidad de agua de riego neto (L)
N_{nmax}	= necesidades netas de agua del cultivo en periodo punta (L)
N_p	= potencia absorbida (kW)
N_s	= número de sectores
N_{sd}	= Número de sectores de riego en un día
$N1$	= pendiente del talud exterior de la balsa (decimal)
$N2$	= pendiente del talud interior de la balsa (decimal)
OT_w	= tiempo de operación óptimo en la extracción de agua del sondeo (T)
$OT,$	= tiempo de operación de la red al día (T)
p	= probabilidad de apertura del hidrante (decimal)
P	= precio de la energía ($€ kW^{-1} T^{-1}$)
Pa	= precio de acceso a la potencia ($€ kW^{-1} T^{-1}$)
p_d	= probabilidad de funcionamiento del hidrante en un día específico (decimal)

P_e	= proporción de agua descargada por el equipo que llega al suelo (porcentaje)
PE	= precipitación efectiva (decimal)
P_m	= pluviometría máxima en el extremo de la máquina ($L T^{-1}$)
P_{mR}	= pluviometría máxima del pivot ($L T^{-1}$)
P_o	= presión necesaria en cada hidrante (L)
P_t	= potencia del transformador (kW-T)
$P1$	= horas de coste energético alto (T)
$P2$	= horas de coste energético medio (T)
$P3$	= horas de coste energético bajo (T)
Q	= caudal ($L^3 T^{-1}$)
Q_d	= caudal de descarga ($L^3 T^{-1}$)
Q_d-H_d	= punto de funcionamiento de la bomba (L^3-L)
Q_h	= caudal necesario en cada hidrante ($L^3 T^{-1}$)
$Q-H$	= curvas características caudal-altura manométrica de bomba (L^3-L)
Q_{max}	= caudal máximo de diseño de la red de riego ($L^3 T^{-1}$)
Q_p	= caudal en cabecera del equipo pivot ($L^3 T^{-1}$)
Q_r	= caudal en tramo de tubería que tiene n hidrantes abiertos ($L^3 T^{-1}$)
Q_R	= caudal de rebombeo desde la balsa hasta la red de riego ($L^3 T^{-1}$)
Q_S	= caudal que llega al suelo ($L^3 T^{-1}$)
Q_w	= caudal de bombeo desde el sondeo a la balsa ($L^3 T^{-1}$)
$Q-\eta$	= curva característica caudal-rendimiento de bomba ($(L^3 T^{-1})$ -decimal)
R	= radio del pivot (L)
R_d	= número aleatorio
$RDDC$	= curvas aleatoria de demanda diaria
s	= pendiente del terreno ($L L^{-1}$)
S	= superficie a regar (L^2)
SI	= superficie a impermeabilizar de la balsa (L^2)
SR	= factor de sellado

SS	= capacidad de almacenamiento superficial (L)
SS_d	= capacidad de almacenamiento de las pequeñas depresiones (L)
SS_f	= almacenamiento en el follaje de las plantas (L)
SS_m	= capacidad de almacenamiento de las micro-depresiones (L)
St	= separación entre torres (L)
ST	= superficie de terreno ocupado por la balsa (L^2)
t	= tiempo (T)
T	= tiempo transcurrido desde que inicia la aplicación de agua en un punto (L)
Ta	= anchura del pasillo de coronación de la balsa (L)
T_{PP}	= tiempo máximo de paso del pivot en el extremo (T)
t_r	= tiempo de riego (T)
t_{rd}	= tiempo de riego diario de cada parcela (T)
U	= percentil según nivel de confianza de una distribución normal (decimal)
V_m	= velocidad mínima del pivot ($L T^{-3}$)
V_d	= volumen de agua requerido de los cultivos para un día (L^3)
VL	= volumen aportado para construir los terraplenes de la balsa (L^3)
V_{max}	= volumen máximo de la balsa (L^3)
V_{min}	= volumen mínimo de la balsa (L^3)
V_P	= volumen de agua bombeado del sondeo a la balsa (L^3)
V_r	= volumen de regulación de la balsa (L^3)
V_T	= volumen total de la balsa (L^3)
V_u	= volumen útil óptimo de la balsa (L^3)
VX	= volumen excavado en la balsa (L^3)
W_R	= anchura mojada por los aspersores en el extremo de la máquina (L)
η_d	= eficiencia de bomba en el punto de funcionamiento (decimal)
ΔZ_s	= diferencia de elevación entre la boca del sondeo y la balsa (L)
ΔZ_p	= diferencia de elevación en el pivot (L)

7.2. ARTÍCULO CIENTÍFICO TITULADO “OPTIMAL RESERVOIR CAPACITY FOR CENTRE PIVOT IRRIGATION WATER SUPPLY: MAIZE CULTIVATION IN SPAIN”, PUBLICADO EN REVISTA BIOSYSTEMS ENGINEERING.

BIOSYSTEMS ENGINEERING 135 (2015) 61–72

Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

journal homepage: www.elsevier.com/locate/issn/15375110

Research Paper

Optimal reservoir capacity for centre pivot irrigation water supply: Maize cultivation in Spain



A. Izquier, P. Carrión, J.M. Tarjuelo, M.A. Moreno*

Centro Regional de Estudios del Agua (CREA), University of Castilla–La Mancha, Ctra. de Las Peñas km. 3.4, 02071 Albacete, Spain

ARTICLE INFO

Article history:

Received 11 December 2014

Received in revised form

13 April 2015

Accepted 28 April 2015

Published online 22 May 2015

Keywords:

Centre pivot

Reservoir

Energy efficiency

Irrigation

Optimisation

Centre pivots are one of the most widespread irrigation systems in the world. The aim was to develop a tool to optimise the design and management of the water distribution and centre pivot systems seeking to minimise water application cost per unit area (C_T), including investment (C_i), operation (C_o), and maintenance costs. With this aim, two options were considered: to feed the centre pivot 1) directly from an aquifer or 2) using a regulation reservoir. A software tool DEPIRE (design of centre pivot with regulating reservoir), was developed and implemented in MATLAB 2012b (The MathWorks Inc., Natick, MA, USA). It determines optimal flows, pipe diameters, pumps power and the volume of the regulation reservoir for any crop water requirement, different electricity rates and water availability in the tube well. With this tool, the effect of the irrigated area (S), dynamic water level (DWL) in the aquifer and the pumping flow rate on the C_T was evaluated for a maize crop in Spain. The study area representing the minor C_T was 70 ha for direct pumping from the borehole and 100 ha when using an intermediate reservoir. Incorporating a regulation reservoir generates lower C_T than direct feed from the borehole for $S > 100$ ha for any DWL. C_T increased linearly with the DWL due to a significant increase in C_o which primarily affects the cost of water extraction from the aquifer, with a smaller effect on the application cost of the irrigation system.

© 2015 IAGRE. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Groundwater is the sole potable water supply for countries such as Denmark, Malta, and Saudi Arabia. It is also the most important part of total water supply in many other countries including Tunisia (95%); Belgium (83%); The Netherlands; Germany and Morocco (75%) (UNESCO, 2004). In countries with arid and semiarid climates, groundwater is also widely

used for irrigation and approximately one-third of the world's landmass is irrigated by groundwater. Of the total irrigated land in the United States of America, 45% is irrigated by groundwater, 58% in Iran, 67% in Algeria and 40% in Spain. Ground water resources require high energy consumption for water abstraction. Over the 2008–2012 period energy prices in Europe increased by 4% per annum (OOM, 2014). In Spain the cost of electricity increased by more than 150% since 2008 and there is a high energy dependence from irrigation because

* Corresponding author.

E-mail addresses: Argenis.Izquier@alu.uclm.es (A. Izquier), Pedro.carrión@uclm.es (P. Carrión), Jose.Tarjuelo@uclm.es (J.M. Tarjuelo), Miguelangel.Moreno@uclm.es (M.A. Moreno), <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.04.015>
1537-5110/© 2015 IAGRE. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.