



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA



Escuela Técnica Superior de  
Ingeniería Agronómica y de Montes



# OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA EN EXPLOTACIONES DE REGADÍO

## Equipo de trabajo:

Emilio Camacho Poyato. Catedrático de Ingeniería Hidráulica  
Juan Antonio Rodríguez Díaz. Profesor Titular de Ingeniería Hidráulica  
Pilar Montesinos Barrios. Catedrática de Ingeniería Hidráulica  
Jorge García Morillo. Profesor Ayudante Doctor de Ingeniería Hidráulica  
Rafael González Perea. Contratado Juan de la Cierva  
José Manuel Pérez Padillo. Contratado de Investigación





# El regadío en relación al agua y la energía



## Retos

- **Eficiencia y protección del medio ambiente (sostenibilidad)**

Los recursos son limitados y hay que usarlos de forma eficiente

- **Innovación para ser más competitivos**

Integrar las nuevas tecnologías y los nuevos conocimientos

## Desafíos

- **Mejorar la gestión**

- **Reducir la dependencia energética**



# La energía en el regadío



- **Gran aumento** de los costes eléctricos
- Se busca que la agricultura incorpore en su desarrollo y gestión la **eficiencia energética** para alcanzar los objetivos ambientales (vinculación con las ayudas)
- **Gran potencial de ahorro** en el regadío
- Las infraestructuras de riego requieren una media de **2kW/ha** y un consumo medio de **1500 kWh/ha**
- La mitad del consumo energético en los sistemas de riego corresponde a energía eléctrica en las estaciones de bombeo
- Posibilidad de incorporar la **energía fotovoltaica**
- Disponibilidad de incorporar la **tecnología**



# Objetivos



- Optimizar el uso de la energía asociada al riego en explotaciones agrícolas.
- Aumentar la productividad, reduciendo el uso del agua y los costes asociados al riego.



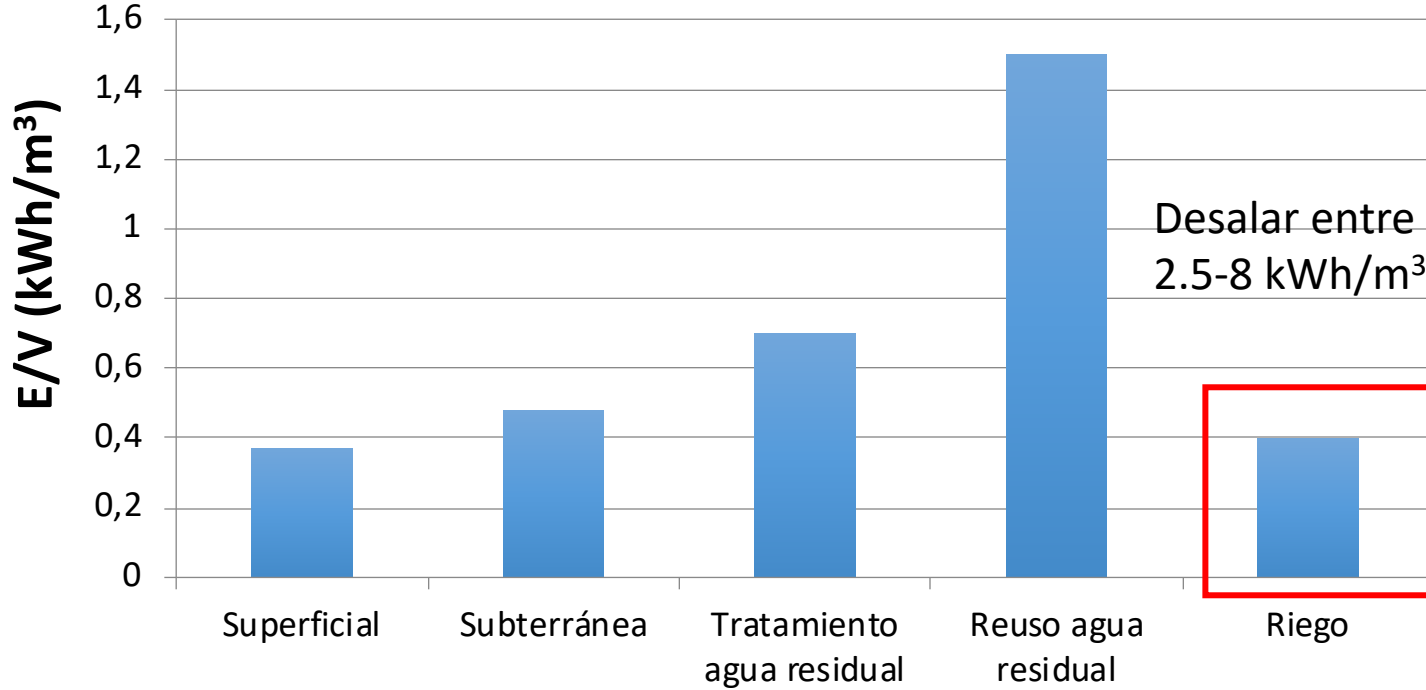
# La relación AGUA-ENERGÍA



$$\text{Energía} = E = P \cdot t = \frac{\gamma V H}{\eta}$$

↓ Optimizar **volumen de agua (V)**  
↓ Optimizar **altura energía (H)**

Desafíos



## Datos de interés:

- **1 m³** elevado 100 m requiere **0.36 kWh**
- **1 L/s** elevado 100 m requiere **1.31 kW**
- El riego por aspersión requiere hasta **4** veces más potencia que el riego localizado

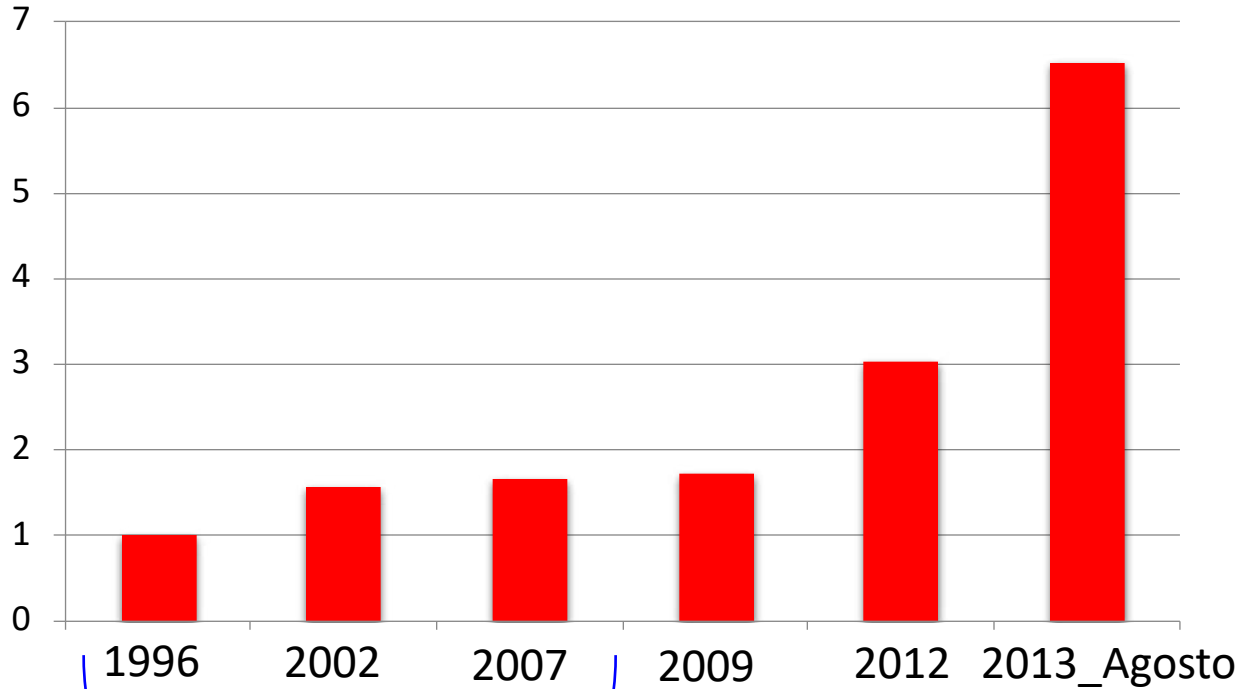


# Variación del precio de la potencia

Referencia año 1996



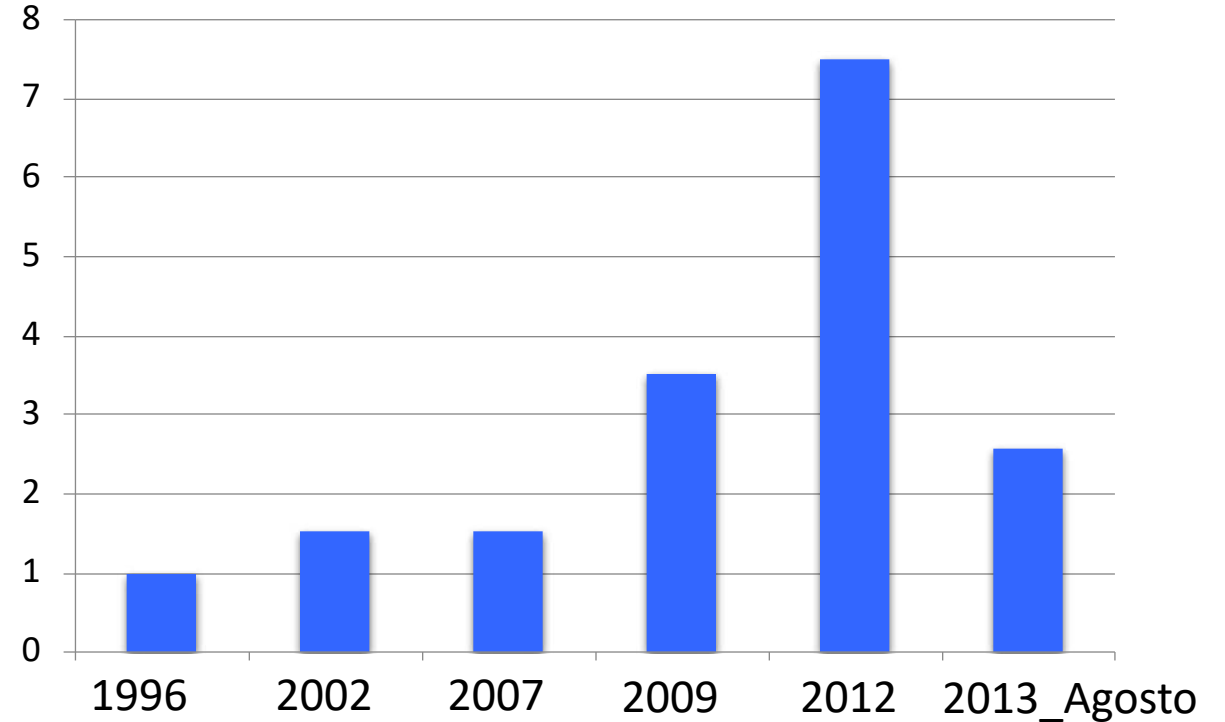
## Potencia



Planes de modernización

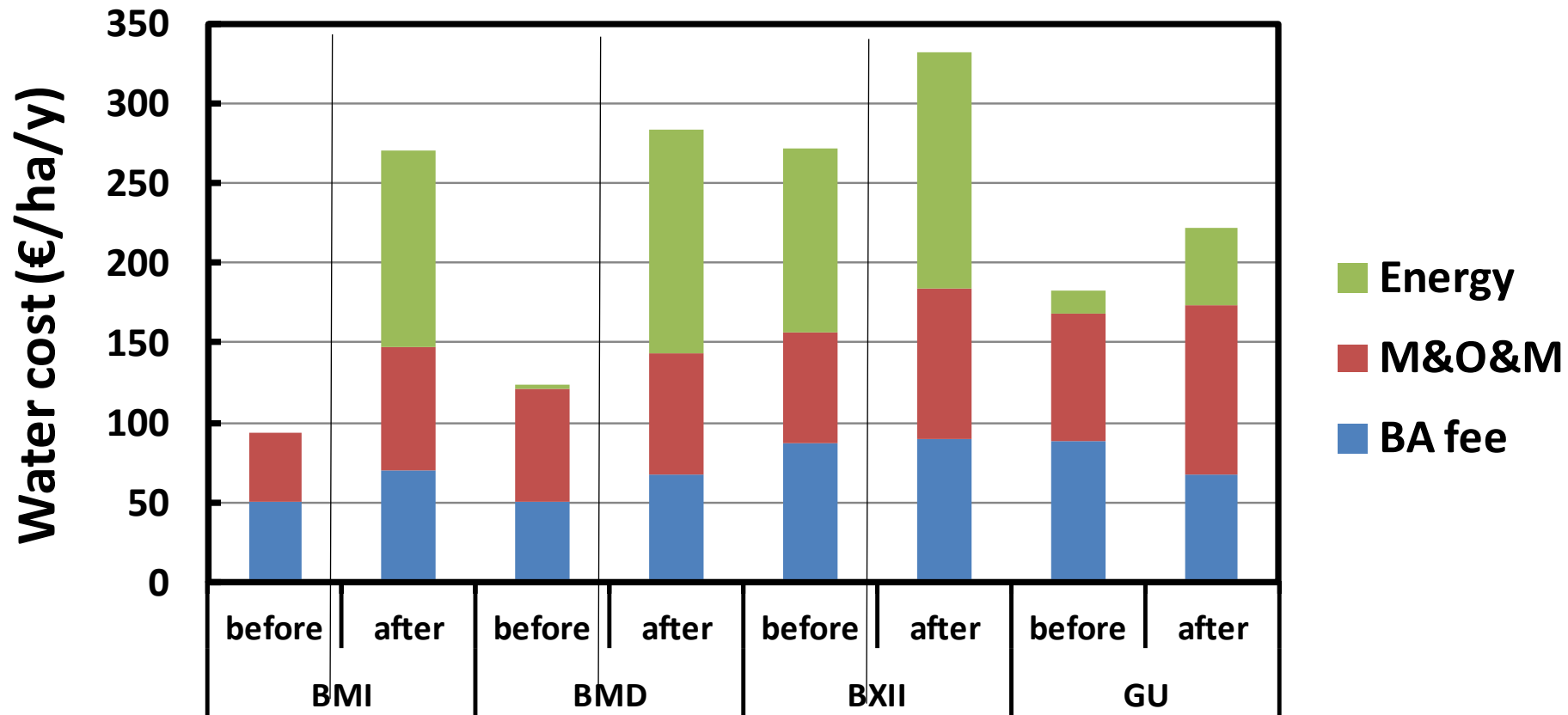
Liberalización  
mercado energía

## Energía



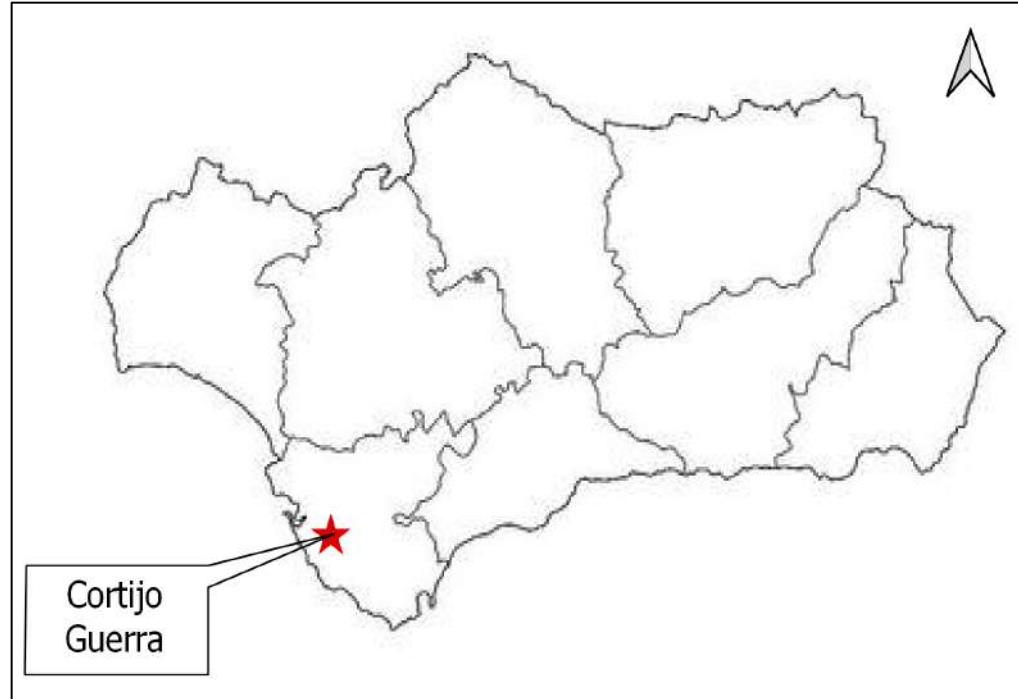


# Consecuencias del precio de la energía





# Zona de estudio



Superficie: 127 ha

Cultivos: Algodón, trigo duro, remolacha

TM: Puerto Real



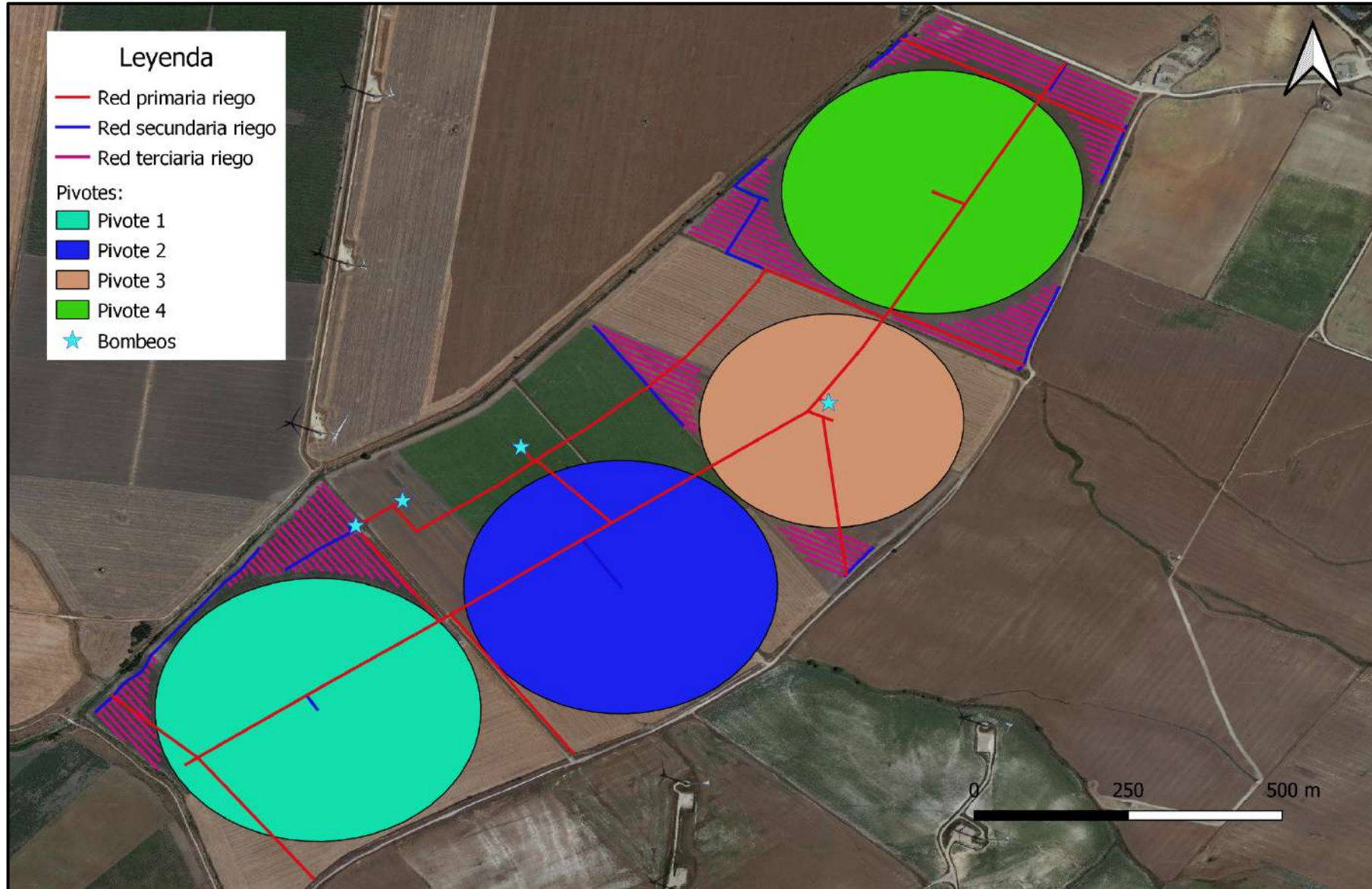


# Zona de estudio





# Zona de estudio





# Auditoría energética

Propuesta IDAE de indicadores para evaluar la eficiencia energética en regadío



**Evaluar el consumo energético y proponer y valorar medidas que supongan un incremento de la eficiencia energética y por tanto un ahorro energético y económico**

# Fases auditoría energética

## **Obtención de datos:**

- Información proporcionada por los gestores y técnicos.
- Medidas de datos de campo: parámetros hidráulicos, eléctricos y topográficos.

**Cálculo de indicadores descriptivos, de rendimiento o eficiencia y de funcionamiento.**

**Clasificación energética de la Comunidad de Regantes**

**Aplicación de datos a modelos de simulación hidráulica y energética**

**Propuesta de mejoras**



# Consumo de energía

Ref. contrato 1:		227477558	Tarifa:	R1 DH4 MF2					
Identificación:									
Mes	Término potencia	Energía Activa kWh	Energía Reactiva kWhr	cos $\phi^*$	Punta kWh	Llano kWh	Valle kWh	Potencia maxímetro kW	Total factura
Enero	187	2.296	2.960	0,61	419	650	1.227	7	535,31
Febrero	528	27.486	4.165	0,99	372	682	36.432	330	2.102,71
Marzo	531	18.984	5.308	0,96	1.039	951	16.994	331	1.748,35
Abril	531	17.779	4.633	0,97	381	2.958	14.440	331	1.650,23
Mayo	516	14.340	7.871	0,88	323	1.342	12.675	326	1.424,51
Junio	214	62.971	9.616	0,99	1.283	978	60.710	214	4.103,99
Julio	522	107.802	8.774	1,00	439	582	106.781	328	7.083,22
Agosto	534	143.561	9.427	1,00	370	12.166	131.025	332	9.896,31
Septiembre	543	99.399	10.513	0,99	370	592	98.437	335	6.790,62
Octubre	540	10.364	2.529	0,97	365	457	9.542	334	1.175,18
Noviembre	187	1.755	1.069	0,85	317	577	861	4	370,40
Diciembre	187	18.067	517	1,00	956	1.049	16.062	117	1.460,23
TOTALES		524.804	67.382		6.634	495.186	22.984	335	38.341,00

## Indicadores descriptivos

NOMBRE INDICADOR
Volumen de agua de riego que entra al sistema (m <sup>3</sup> )
Volumen de agua de riego suministrada a los usuarios (m <sup>3</sup> )
Suministro de agua de riego por unidad de área regable (m <sup>3</sup> /ha)
Suministro de agua de riego por unidad de área regada (m <sup>3</sup> /ha)
Potencia total contratada (kW)
Potencia total consumida (kW)
Energía anual consumida (kWh)
Energía reactiva consumida (kWh)

## Indicadores de funcionamiento

NOMBRE INDICADOR
Rendimiento de potencia (%)
Potencia contratada por unidad de área regable (kW/ha)
Potencia consumida por unidad de área regada (kW/ha)
Energía consumida por área regada (kWh/ha)
Potencia consumida por volumen de agua de riego que entra al sistema (kW/m <sup>3</sup> )
Energía consumida por volumen de agua de riego que entra al sistema (kWh/m <sup>3</sup> )
Coste energético por área regada (€/ha)
Coste energético por área regable (€/ha)
Coste energético por m <sup>3</sup> que entra al sistema (€/m <sup>3</sup> )
Coste energético por m <sup>3</sup> suministrado a los usuarios (€/m <sup>3</sup> )
Gasto energético (%)

# Indicadores de eficiencia

## **IDE: Índice de dependencia energética (%)**

Representa el porcentaje de agua que es bombeada frente al total de agua que entra a la CCRR.

$$\frac{\text{Volumen total bombeado}}{\text{Volumen de agua que entra al sistema}}$$

## **ICE: Índice de carga energética (m):**

$V_i$  y  $H_i$  son el volumen y la altura manométrica suministrada por el bombeo  $i$ . Representa la altura manométrica media suministrada por los bombeos, incluyendo los puntos de suministro que no precisan bombeo

$$\frac{\sum V_i \cdot H_{mi}}{\text{Volumen de agua que entra al sistema}}$$

## **EEB: Eficiencia energética de bombeos (%)**

Es la relación entre potencia hidráulica suministrada ( $N_s$ ) por los bombeos y potencia eléctrica absorbida ( $N_c$ )

$$EE_i(\%) = \frac{N_s}{N_c} \cdot 100$$

***ESE: Eficiencia de suministro energético (%):***

Es el cociente entre la energía necesaria a aportar al sistema y la energía real aportada

$$\frac{|\Delta E|}{ICE} \quad \text{Si } \Delta E < 0$$

El  $\Delta E$  es la diferencia entre la energía inicial (EI) con la que el agua es captada para abastecer al sector hidráulico y la energía demandada (ED) por el sistema de riego abastecido.

$$EI - ED = \pm \Delta E$$

***EEG: Eficiencia energética general (%):***

Representa la eficiencia energética general de la red de distribución de toda la comunidad de regantes

$$EEG = EEB \cdot ESE$$



# Calificación energética

## Grupos de consumo energético:

GRUPO	DESCRIPCIÓN	ESPECIFICACIONES
1	No consumidora	EPH = 0
2	Poco consumidora	$0 < \text{EPH} \leq 300$
3	Media consumidora	$300 < \text{EPH} \leq 600$
4	Consumidora	$600 < \text{EPH} \leq 1000$
5	Gran consumidora	EPH > 1000

EPH: Energía activa consumida por hectárea regada (kWh/ha año)

## Eficiencia de los bombeos (EEB)

GRUPO	DESCRIPCIÓN	ESPECIFICACIONES
A	Eficiencia excelente	EEB > 65%
B	Eficiencia buena	$60\% \leq \text{EEB} \leq 65\%$
C	Eficiencia normal	$50\% \leq \text{EEB} \leq 60\%$
D	Eficiencia aceptable	$45\% \leq \text{EEB} \leq 50\%$
E	Eficiencia no aceptable	EEB < 45%

## Eficiencia energética general (EEG):

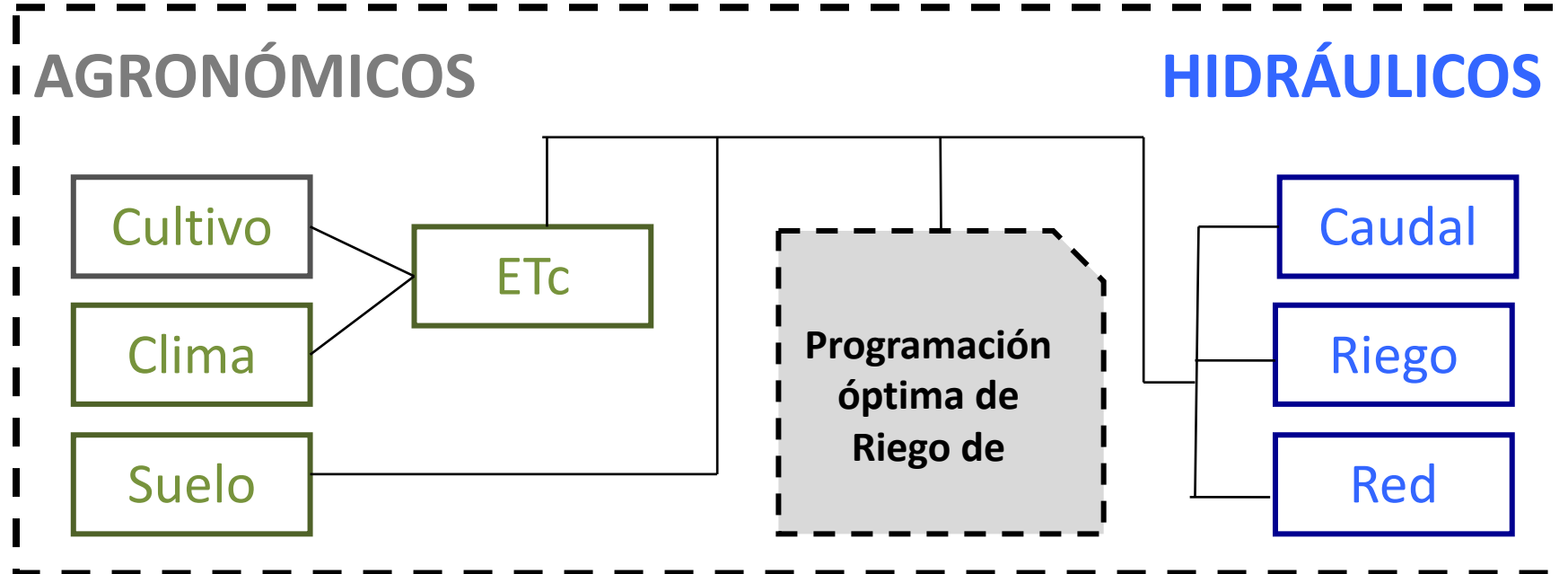
CALIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN	ESPECIFICACIONES
A	Eficiencia excelente	EEG > 50%
B	Eficiencia buena	$40\% \leq \text{EEG} \leq 50\%$
C	Eficiencia normal	$30\% \leq \text{EEG} < 40\%$
D	Eficiencia aceptable	$25\% \leq \text{EEG} < 30\%$
E	Eficiencia no aceptable	EEG < 25%



# Metodología



## Optimización de la programación del riego

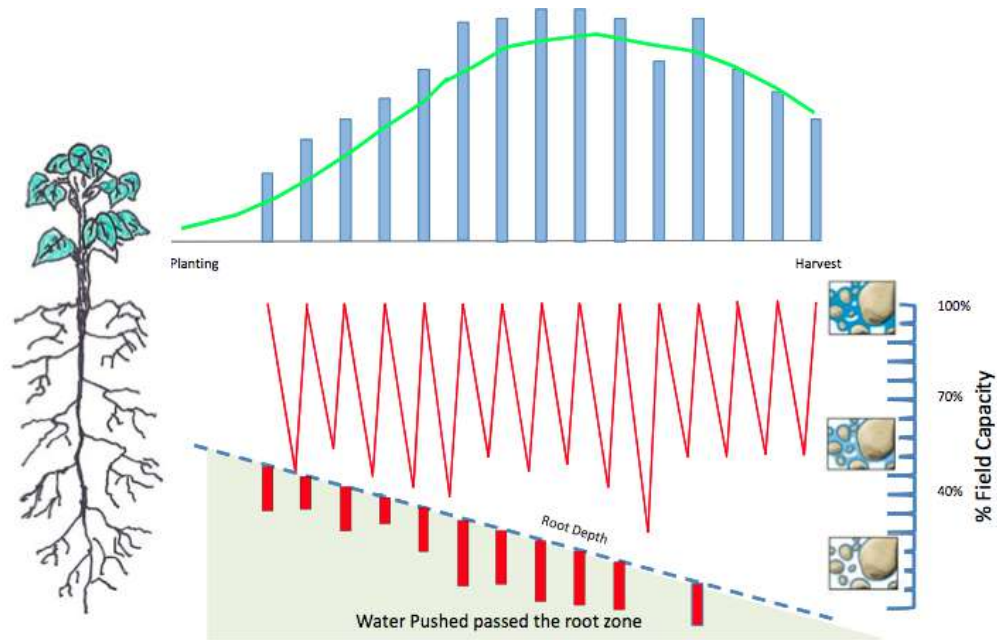




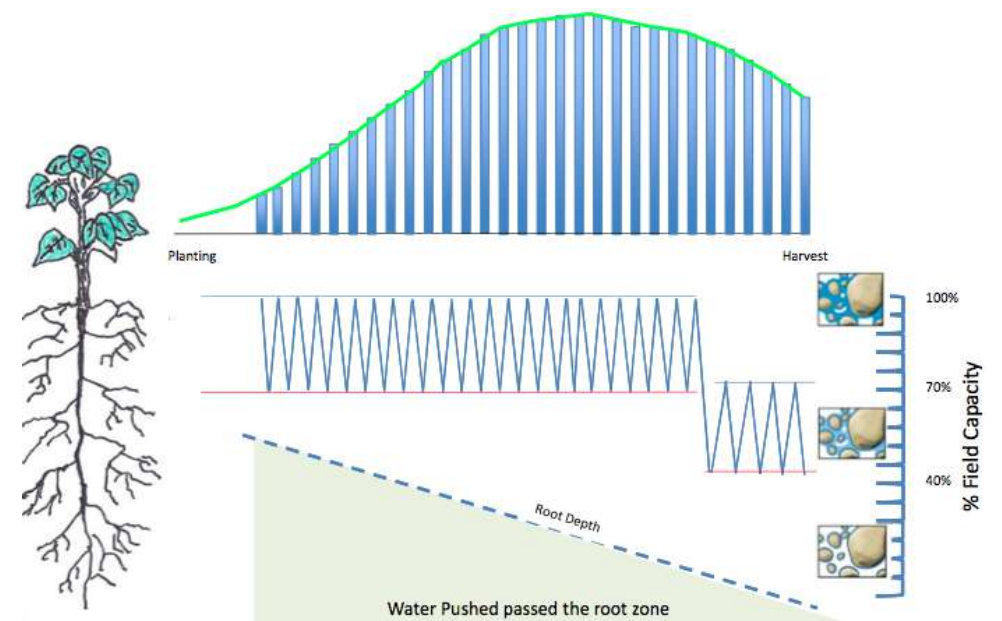
# Optimización de la programación del riego



## Riego convencional



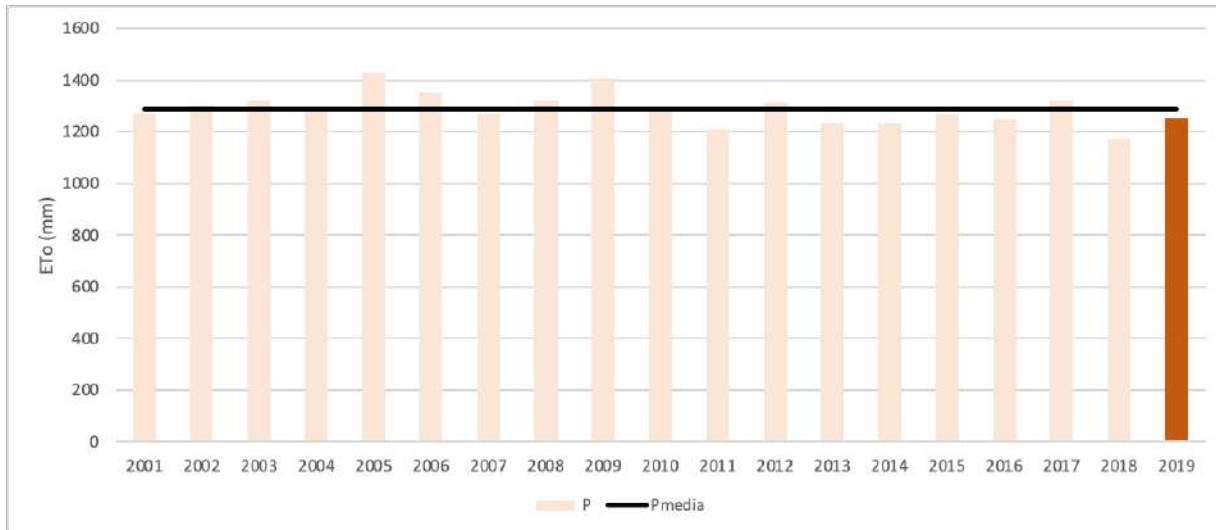
## Riego de precisión



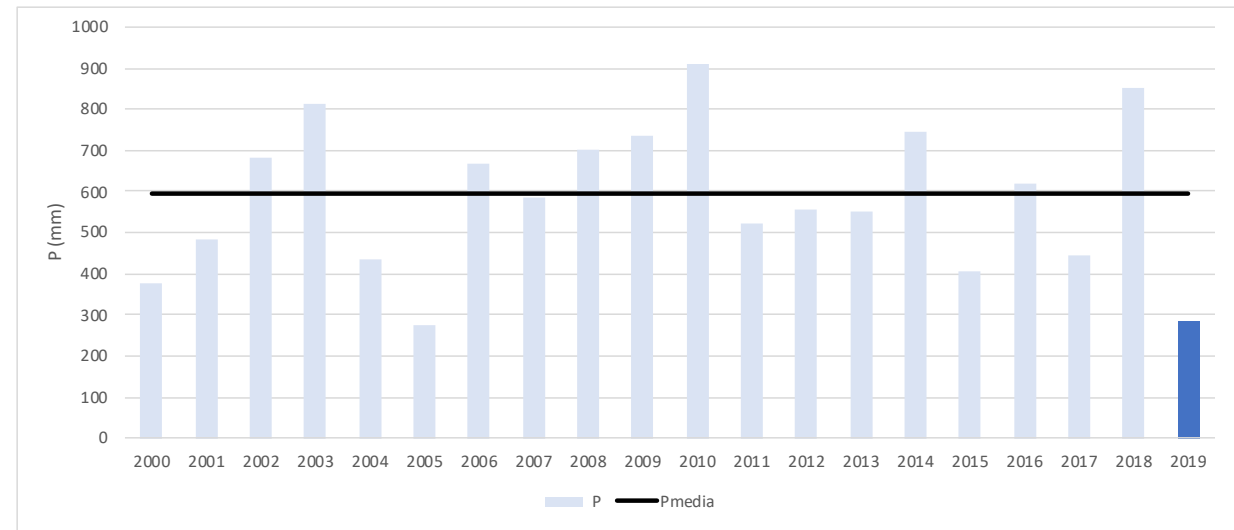


# Caracterización climática de la campaña 2019:

## Evapotranspiración



## Precipitaciones







# Cálculo de las necesidades de riego Algodón 2019



## Precipitaciones mensuales

Estación: Jerez 2019      Método Prec. Ef: Método USDA S. C.

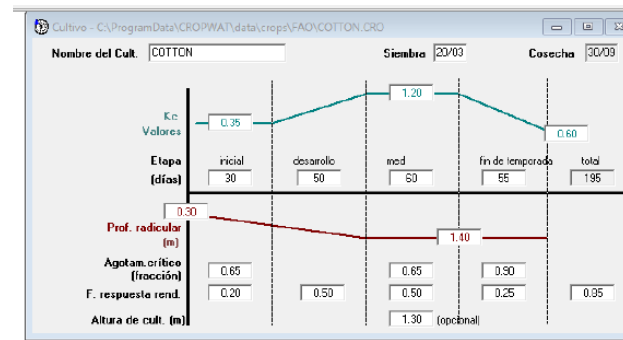
	Precipit. mm	Prec. efec. mm
Enero	35.6	33.6
Febrero	14.4	14.1
Marzo	16.0	15.6
Abril	74.5	65.7
Mayo	0.2	0.2
Junio	0.8	0.8
Julio	0.0	0.0
Agosto	0.0	0.0
Septiembre	1.8	1.8
Octubre	18.8	18.2
Noviembre	74.8	65.8
Diciembre	46.8	43.3
<b>Total</b>	<b>293.0</b>	<b>259.1</b>

## Evapotranspiración mensual

Estación: Jerez 2019

	ETo mm/día
Enero	1.1
Febrero	2.3
Marzo	3.3
Abril	3.5
Mayo	5.4
Junio	5.4
Julio	5.4
Agosto	4.1
Septiembre	2.9
Octubre	1.4
Noviembre	1.0
Diciembre	3.4
<b>Promedio</b>	<b>3.3</b>

## Datos de cultivo

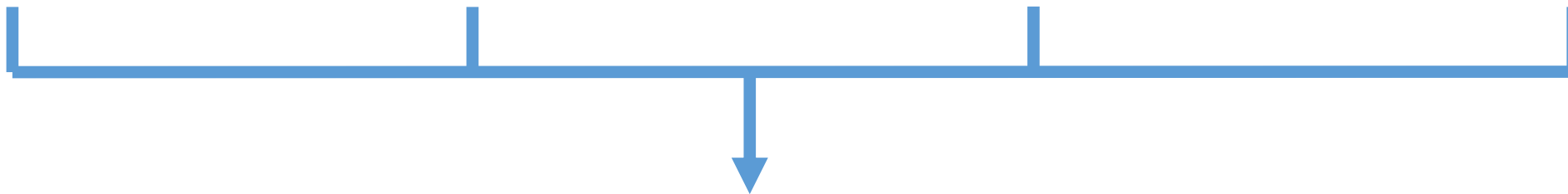


## Datos de suelo

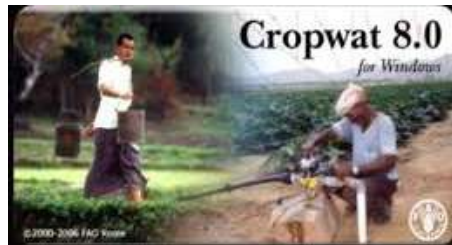
Suelo: Medion (cena)

Datos generales de suelo:

Humedad de suelo disponible total (CC-PMP)	290.0	mm/metro
Tasa máxima de infiltración de la precipitación	40	mm/día
Profundidad radicular máxima	900	centímetros
Agotamiento inicial de hum. de suelo (como % de ADT)	0	%
Humedad de suelo inicialmente disponible	290.0	mm/metro



## Necesidades Teóricas de Riego

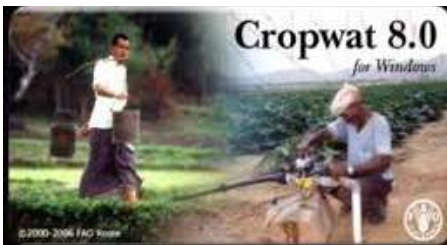




# Cálculo de las necesidades de riego Algodón 2019

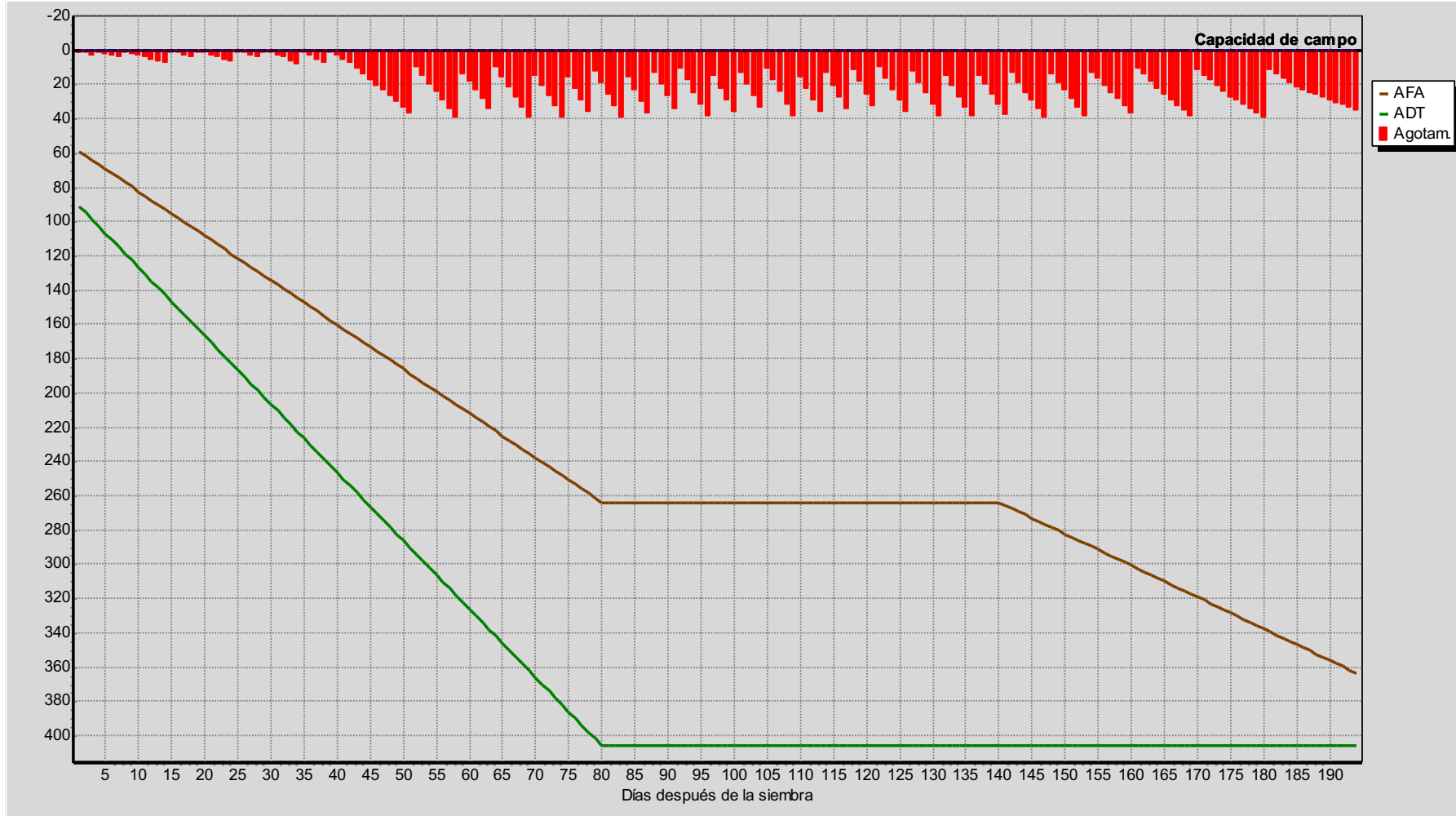


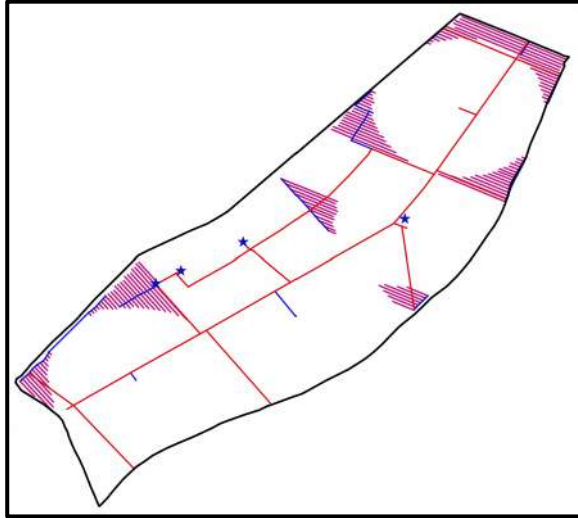
Mes	Decena	Etap	Kc coef	ETc mm/día	ETc mm/dec	Prec. efec mm/dec	Req.Riego mm/dec
Mar	2	Inic	0.35	1.15	1.2	0.3	1.2
Mar	3	Inic	0.35	1.18	13.0	9.3	3.7
Abr	1	Inic	0.35	1.15	11.5	20.0	0.0
Abr	2	Des	0.36	1.17	11.7	27.3	0.0
Abr	3	Des	0.49	1.96	19.6	18.3	1.3
May	1	Des	0.67	3.31	33.1	0.3	32.8
May	2	Des	0.86	4.82	48.2	0.0	48.2
May	3	Des	1.06	5.84	64.2	0.0	64.2
Jun	1	Med	1.24	6.69	66.9	0.2	66.7
Jun	2	Med	1.28	6.90	69.0	0.3	68.7
Jun	3	Med	1.28	6.90	69.0	0.2	68.8
Jul	1	Med	1.28	6.99	69.9	0.1	69.8
Jul	2	Med	1.28	7.03	70.3	0.0	70.3
Jul	3	Med	1.28	6.43	70.7	0.0	70.7
Ago	1	Fin	1.27	5.74	57.4	0.0	57.4
Ago	2	Fin	1.17	4.81	48.1	0.0	48.1
Ago	3	Fin	1.06	3.92	43.1	0.1	43.0
Sep	1	Fin	0.95	3.12	31.2	0.0	31.2
Sep	2	Fin	0.84	2.42	24.2	0.0	24.2
Sep	3	Fin	0.73	1.74	17.4	1.9	15.5
<b>TOTAL</b>					<b>839.8</b>	<b>78.4</b>	<b>785.7</b>





# Manejo óptimo del riego Algodón 2019





Información geográfica

	gestion	estado	ano_servic	numero_de_	potencia_j	altura_de_
0	DP	B	0	2	300	290
1	DP	B	0	6	1320	150
2	DP	B	0	2	360	115
3	DP	B	0	4	320	115
4	DP	B	0	2	120	172
5	DP	B	0	2	70	54
6	DP	B	0	2	125	100
7	DP	B	0	2	30	69
8	DP	B	0	1	20	5
9	DP	B	0	3	180	176
10	DP	B	0	2	75	90

Información alfanumérica

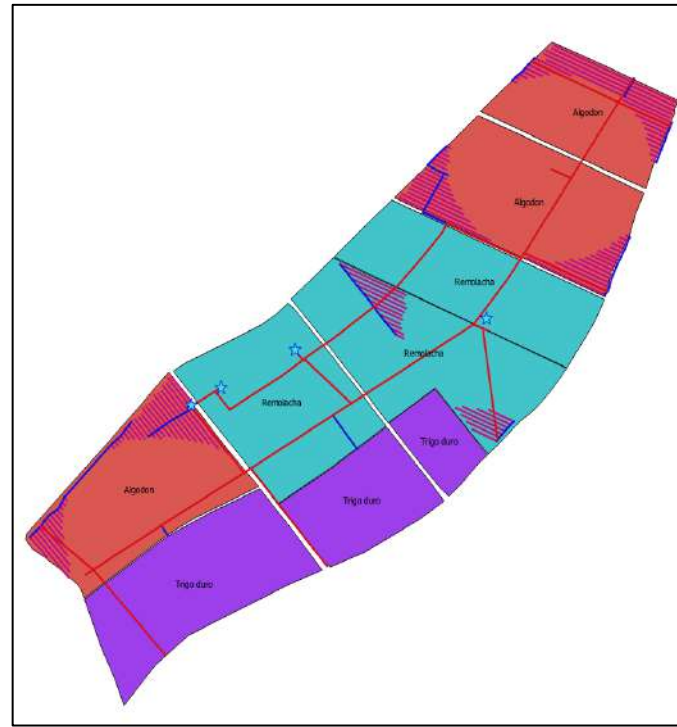
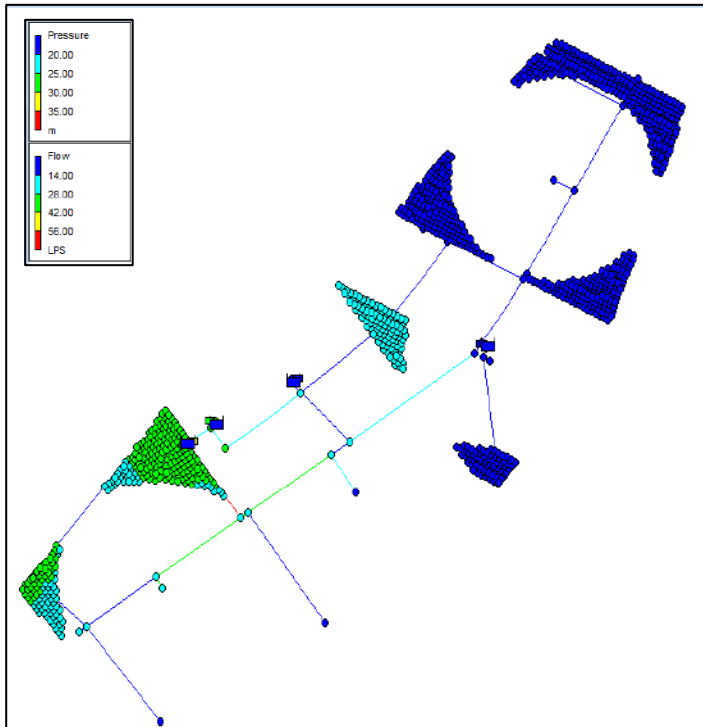
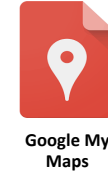
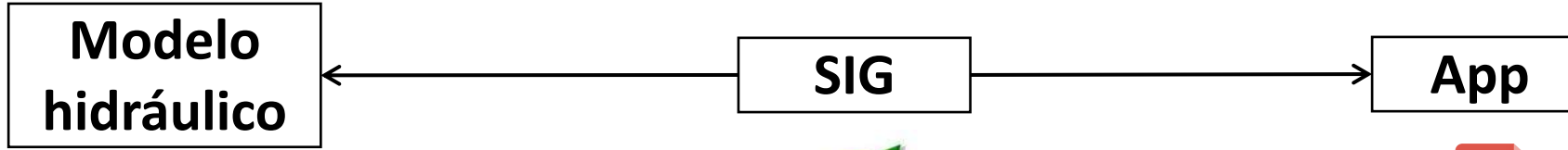
Sistema de Información Geográfica (SIG)

Modelación hidráulica





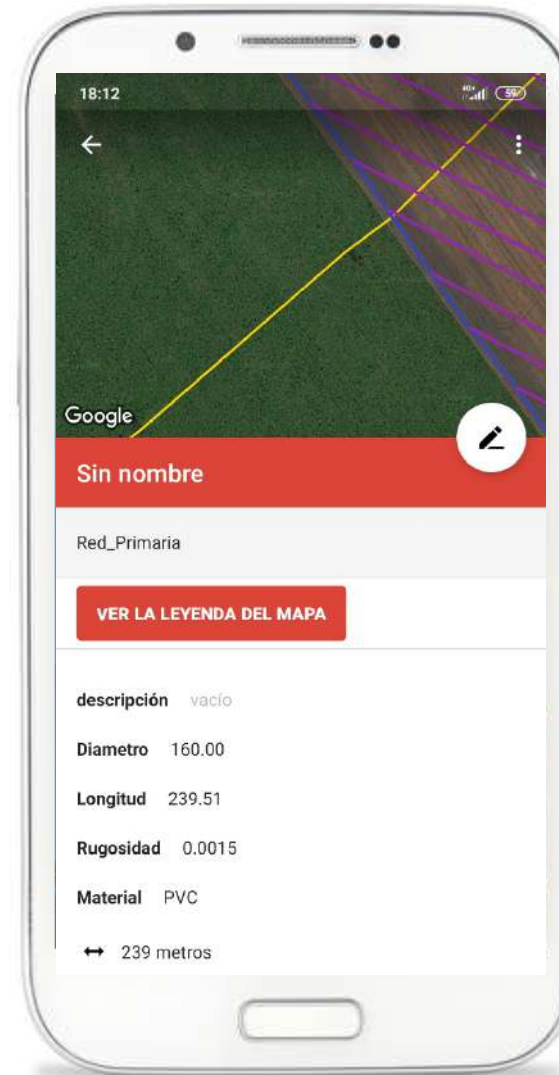
# Metodología





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

# APP. Visor en dispositivos móviles





# APP. Visor en dispositivos móviles

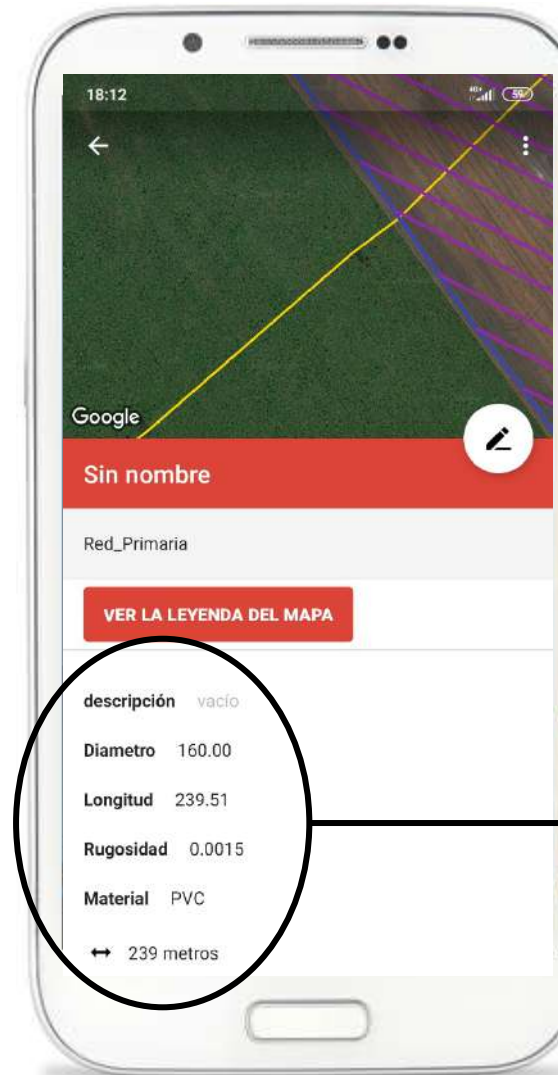
Visor de la información geográfica

**Software gratuito**



**Cartografía colaborativa**

Información de la red de riego







# Proceso de creación del SIG



Recogida de información existente



Georreferenciación en campo con GPS

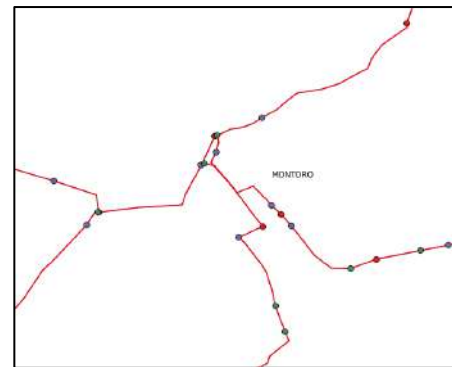


Exportación a formato SIG

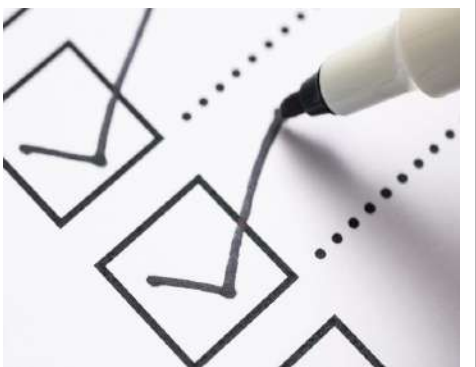


estado	tipo_valvu	cierra	accionamie	diametro
B	PG	CO	MO	600
B	PG	CO	MO	600
B	PG	CO	MO	600
B	PG	CO	MO	600
B	PG	MA	MO	600
B	PG	MA	MO	600
B	PG	MA	MA	600
B	PG	MA	MA	250
B	PG	MA	MA	250

Caracterización de los elementos



Creación del trazado de las tuberías



Verificación de la información



# Creación del modelo hidráulico



**Sistema de Información Geográfica**



**Modelo hidráulico**



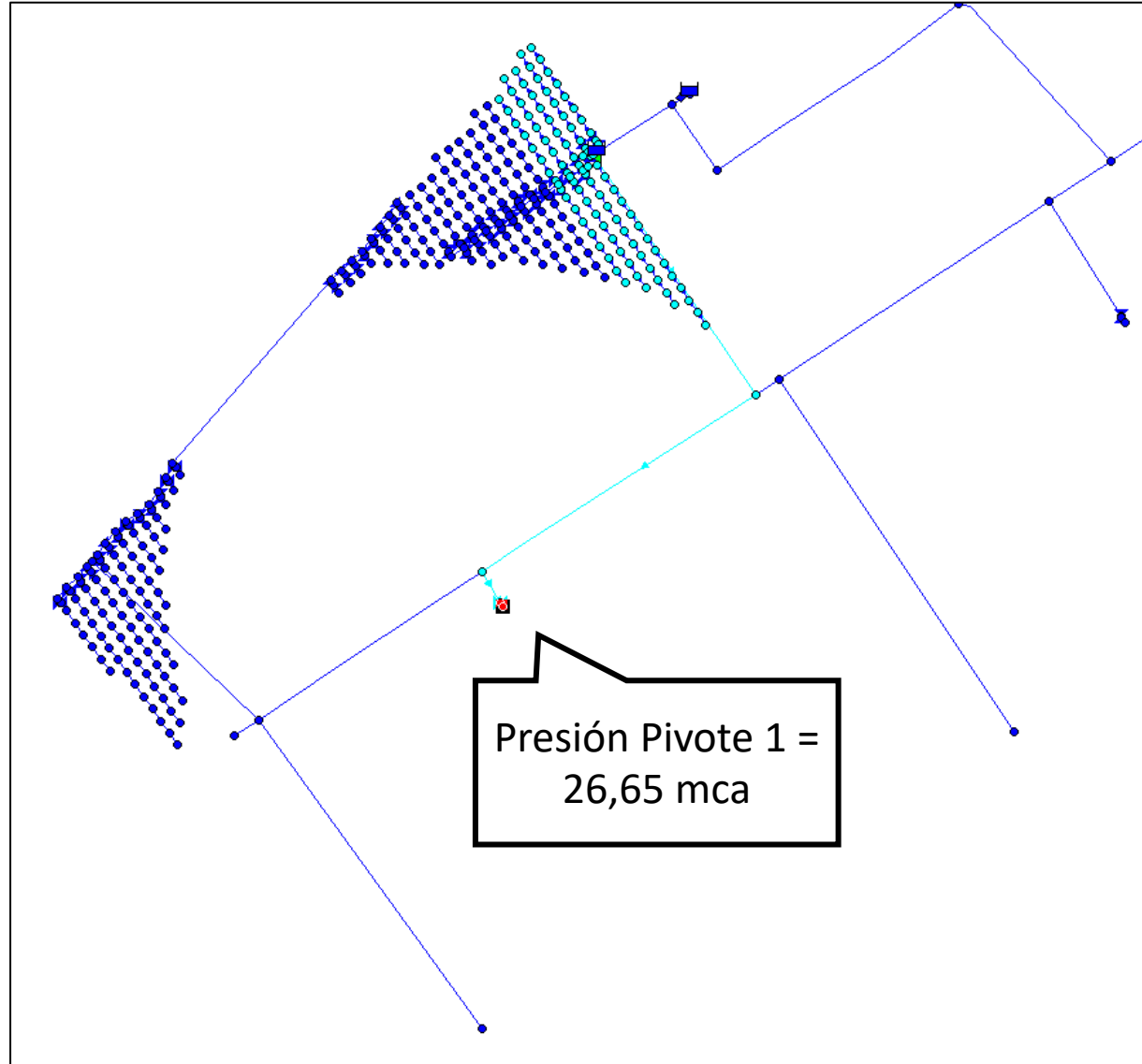




# Variador de frecuencia



- Mes del año: Julio
- Cultivo: algodón
- Necesidades hídricas =  $7,1 \text{ l/m}^2$



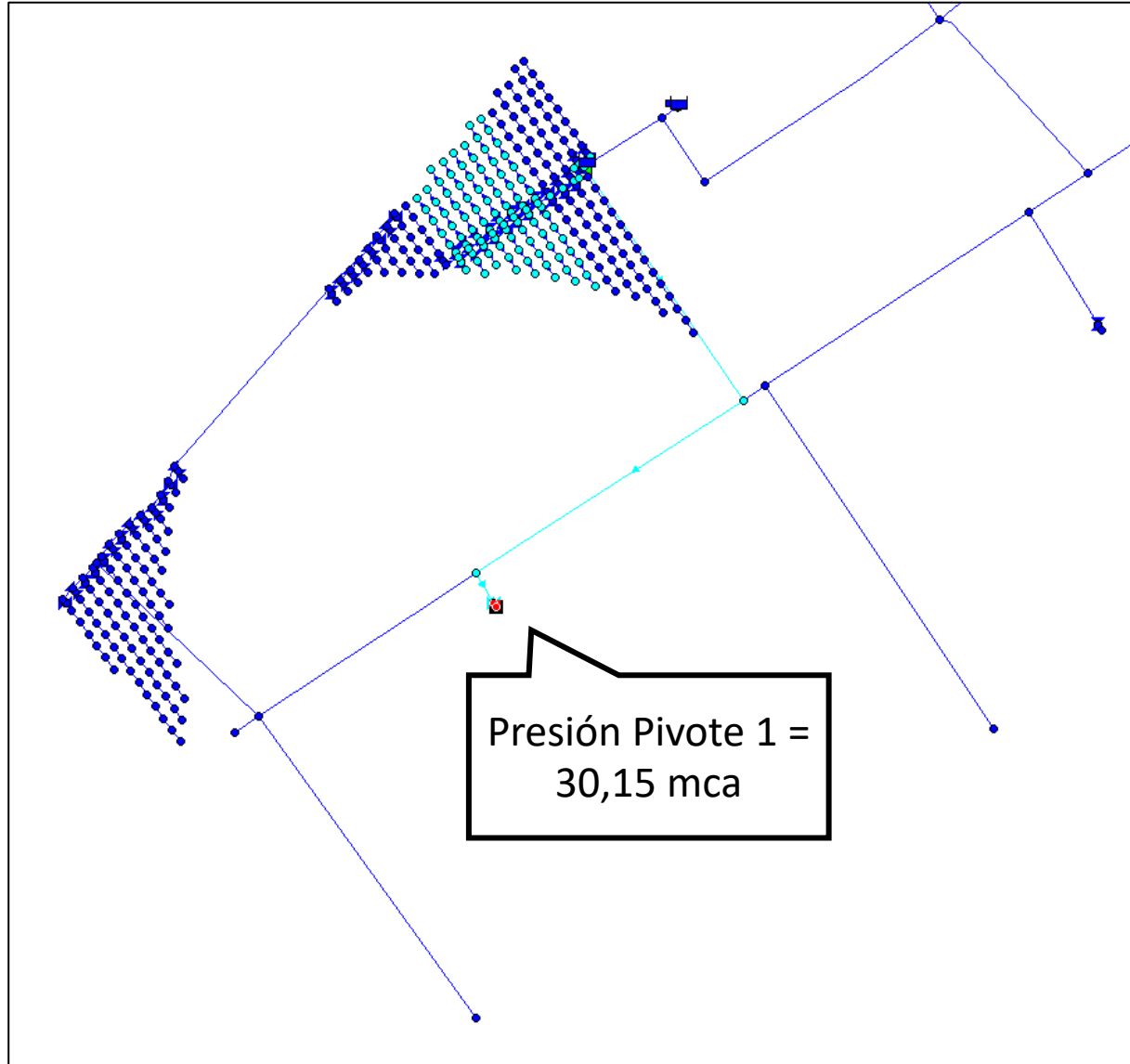
**Escenario 1:**  
Riego: pivote + 5 ramales  
Tiempo de riego: 1 hora  
Energía consumida:  $0,23 \text{ kW}\cdot\text{h/m}^3$



# Variador de frecuencia



- Mes del año: Julio
- Cultivo: algodón
- Necesidades hídricas =  $7,1 \text{ l/m}^2$



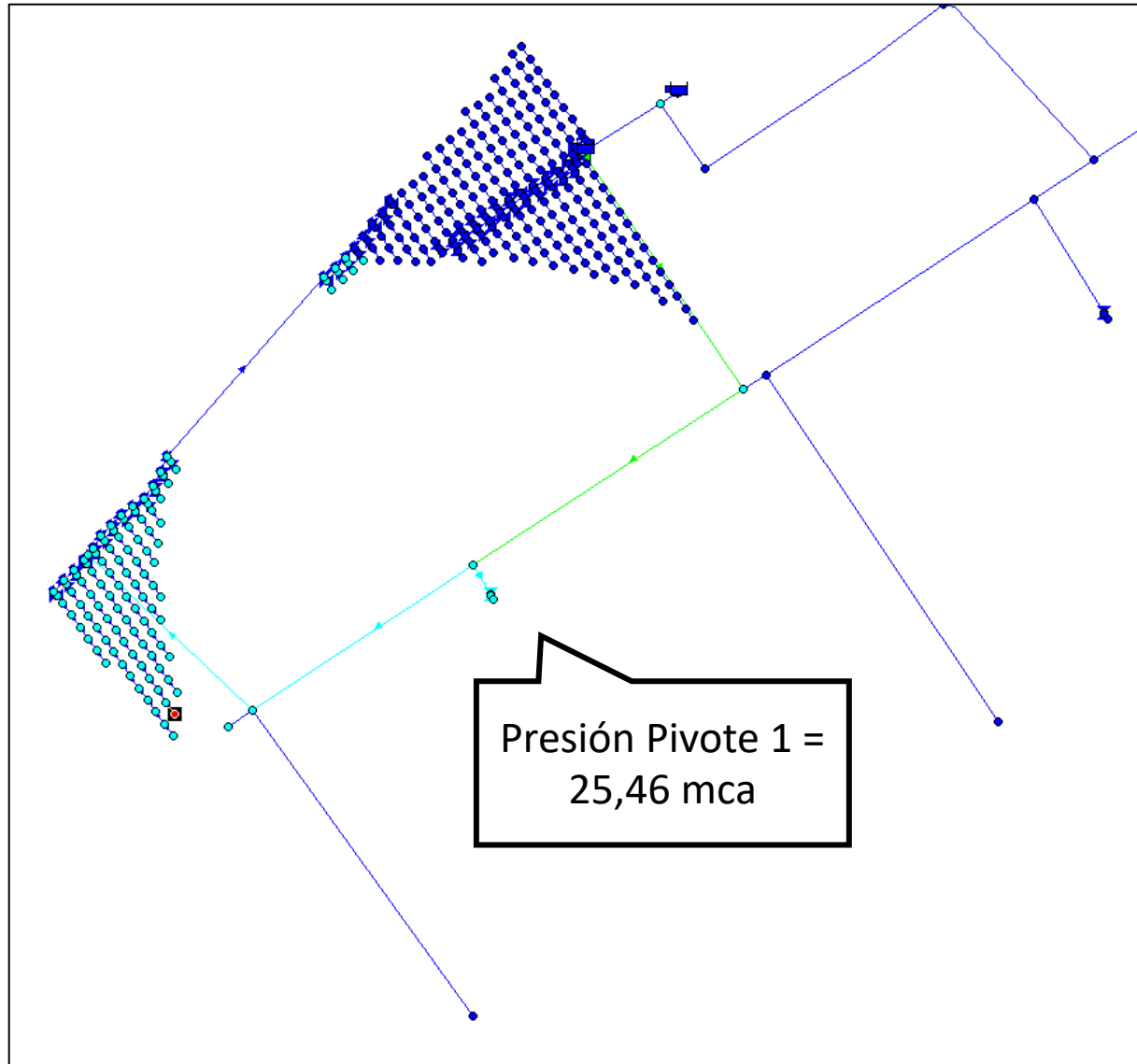
**Escenario 2:**  
Riego: pivote + 8 ramales  
Tiempo de riego: 1 hora  
Energía consumida:  $0,24 \text{ kW}\cdot\text{h/m}^3$



# Variador de frecuencia



- Mes del año: Julio
- Cultivo: algodón
- Necesidades hídricas =  $7,1 \text{ l/m}^2$

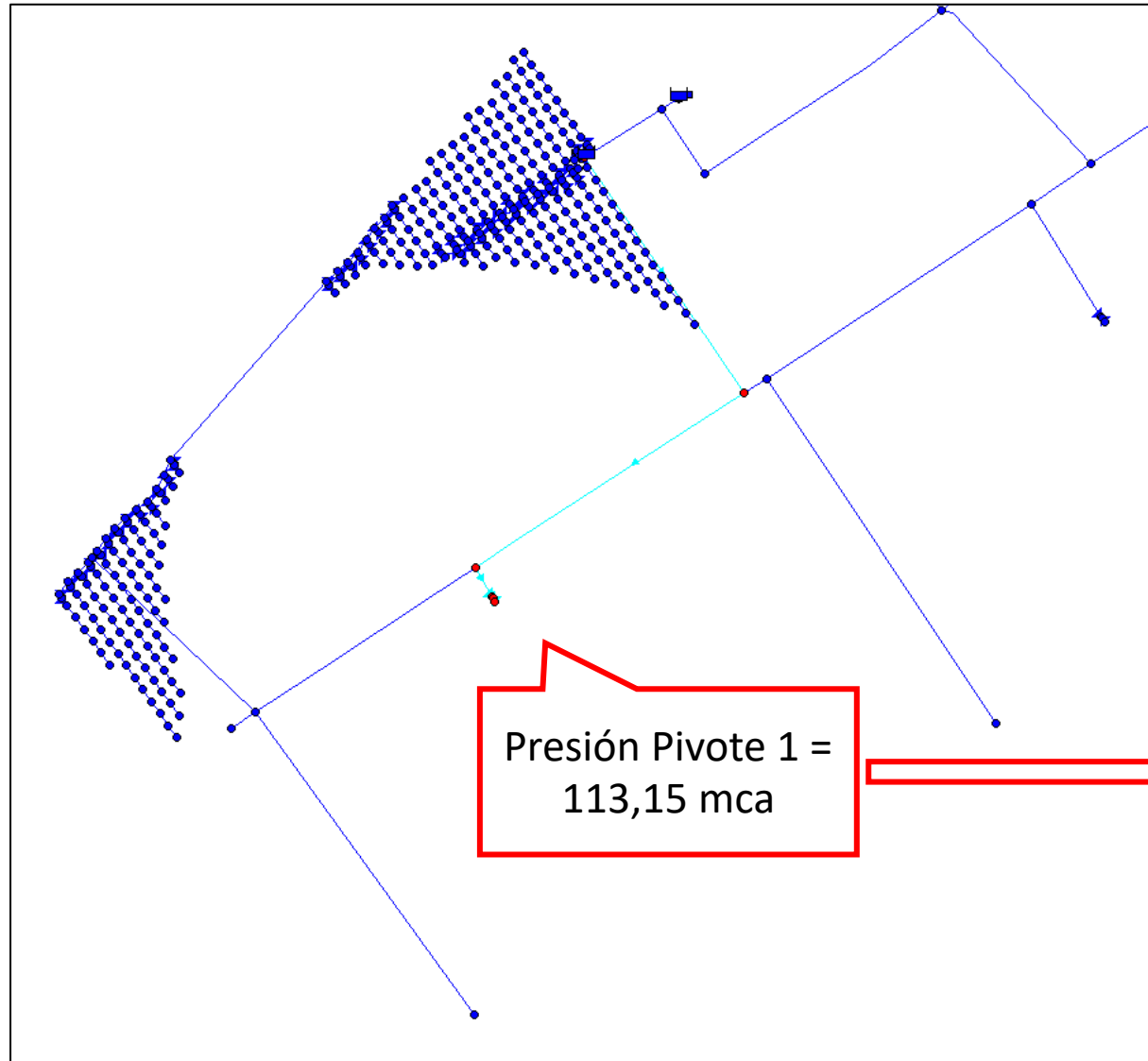


**Escenario 3:**  
Riego: pivote + 17 ramales  
Tiempo de riego: 1 hora  
Energía consumida:  $0,22 \text{ kW}\cdot\text{h/m}^3$



# Variador de frecuencia

- Mes del año: Julio
- Cultivo: algodón
- Necesidades hídricas=  $7,1 \text{ l/m}^2$



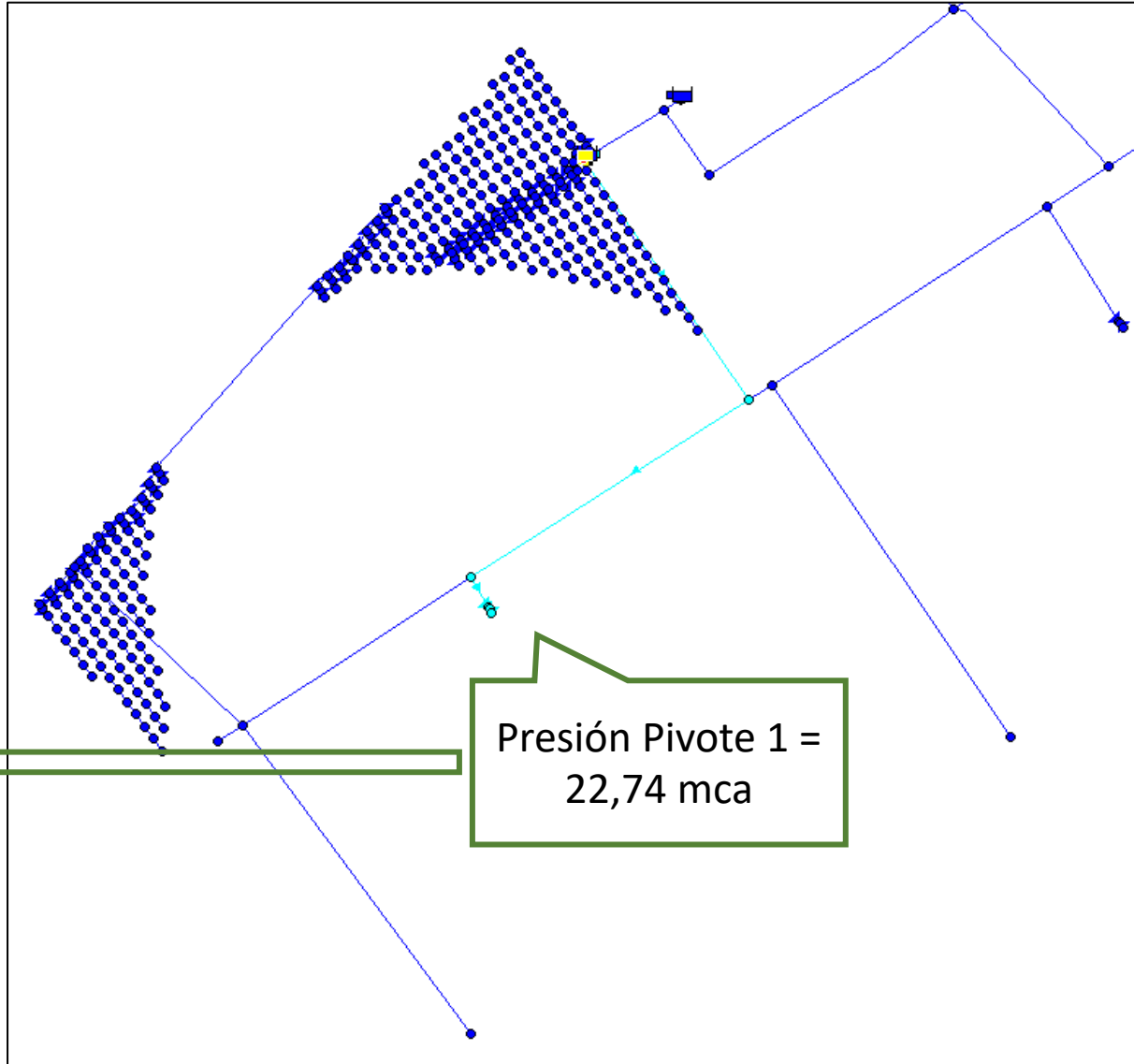
**Escenario 4:**  
Riego: pivote  
Tiempo de riego: 3 horas  
Energía consumida:  $0,54 \text{ kW}\cdot\text{h/m}^3$

Posibilidad de  
variador de  
frecuencia para  
reducir la presión



# Variador de frecuencia

- Mes del año: Julio
- Cultivo: algodón
- Necesidades hídricas= 7,1 l/m<sup>2</sup>



Implementación  
variador de  
frecuencia

Presión Pivote 1 =  
22,74 mca

**Escenario 4:**  
Riego: pivote  
Tiempo de riego: 3 horas  
Energía consumida: 0,22 kW·h/m<sup>3</sup>

Escenario	Energía consumida (kW·h/m <sup>3</sup> )	Precio estimado (€)
Sin variador	0,54	152,41
Con variador	0,22	62,09





# Consecuencias de una mala programación de riego



	Energía consumida (kW·h/m <sup>3</sup> )	Dosis de riego (m <sup>3</sup> )	Tiempo de riego	Precio estimado (€)
<b>Riego optimizado</b>	0,22	784,01	6 horas	124,18
<b>Riego excesivo (30 % más)</b>	0,22	1022,4	7 horas y 50 minutos	210,95





**Gracias por su atención**

Jerez 18 septiembre de 2020

Emilio Camacho Poyato  
ecamacho@uco.es