



Trabajo Fin de Grado

Título del trabajo:

Modelado y propuesta de mejora de un sistema de riego por goteo para el riego de frutales.

English tittle:

Modeling and upgrade proposal for drip irrigation of fruit trees.

Autor/es

Pau Urdeitx Diaz

Director/es

Javier Blasco Alberto
Departamento de mecánica de fluidos.

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
Grado en ingeniería mecánica.
Curso 2015-2016



DECLARACIÓN DE
AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

TRABAJOS FIN DE GRADO / FIN DE MÁSTER

D./Dª. Pau Urdeitx Díaz,

con nº de DNI 18057332D en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster) Grado

Modelado y propuesta de mejora de un sistema de riego por gotero para el riego de frutales.

, es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 30 de Octubre de 2016

Fdo: Pau Urdeitx Díaz

RESUMEN

En el presente proyecto se va a modelar una red de riego por goteo ya instalada. Se busca obtener un modelo que refleje de forma fiel las condiciones de la red real. A partir de este modelo se generará una propuesta de ampliación de dicha red a una serie de parcelas adyacente.

Es importante verificar la correspondencia de los datos obtenidos con el modelo y la red real ya que se va a tratar de obtener una ampliación que trabaje de la manera más óptima posible.

Las fases del proyecto se definen en 4:

- a) Recogida de datos para modelar la red.
- b) Creación de un modelo informático fiel.
- c) Comprobación de los resultados.
- d) Propuesta de ampliación de dicha red.

Se van a utilizar los conocimientos adquiridos en el grado de ingeniería mecánica de distintas áreas lo cual, sumado a que es un proyecto real, hace el proyecto muy atractivo. Para la caracterización de los elementos se van a aplicar los conocimientos de las asignaturas de la rama de fluidos y con más importancia sobre las demás la asignatura de “Teoría de máquinas e instalaciones de fluidos”. A parte de esto, se aplicarán conocimientos informáticos y de programación por la necesidad de crear un programa de apoyo en la creación de los modelos, así como conocimientos de manipulación y creación de planos técnicos.

INDICE GENERAL

I. MEMORIA

- Introducción.
- Descripción de la instalación.
- Generación del modelo.
- Propuesta de ampliación.
- Bibliografía.

II. ANEXOS

- ANEXO I. Datos de la instalación.
- ANEXO II. Datos de la ampliación.
- ANEXO III. Programa C.
- ANEXO IV. Resultados campo A (3-C).
- ANEXO V. Resultados campo B (3-C).
- ANEXO VI. Resultados campo C (3-C).
- ANEXO VII. Resultados campo A (4-C).
- ANEXO VIII. Resultados campo B (4-C).
- ANEXO IX. Resultados campo C (4-C).
- ANEXO X. Resultados campo D (4-C)

T

III. PLANOS

- Plano 1. Emplazamiento de la Instalación.
- Plano 2. Detalle Instalación-Parte 1.
- Plano 3. Detalle Instalación-Parte 2.
- Plano 4.1. Ampliación 3 Campos. General.
- Plano 4.2. Ampliación 3 Campos. Detalles.
- Plano 5.1. Ampliación 4 Campos. General.
- Plano 5.2. Ampliación 4 Campos. Detalles.

DOCUMENTO MEMORIA

TFG: Modelado y propuesta de mejora de un sistema de riego por goteo para el riego de frutales.



**Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza**

Grado en Ingeniería Mecánica

2015-2016

PAU URDEITX DIAZ
608567

INDICE DE MEMORIA

Tabla de contenido

1. Introducción.	2
1.1 Objeto.	2
1.2 Procedimiento.	2
1.3 Herramientas.	3
2. Descripción de la instalación.	4
2.1 Emplazamiento.	4
2.2 Sectorización.	5
2.3 Instalaciones.	7
2.3.1 Red de abastecimiento.	8
2.3.2 Red de riego.	11
3. Generación del modelo.	14
3.1 Descripción del modelo de EPANET.	15
3.2 Programa auxiliar en C.	19
3.3 Resultados obtenidos.	23
4. Propuesta de ampliación.	25
4.1 Ampliación en 3 campos.	25
4.2 Ampliación en 4 campos.	28
4.3 Conclusiones finales.	31
5. Bibliografía.	33

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Objeto.

En el presente proyecto se va a realizar un estudio hidráulico sobre una red de riego por goteo. Para ello y partiendo de los datos de la red de riego real, se va a desarrollar un modelo informático de dicha red. Posteriormente se ofrecerá una propuesta para la ampliación de la red a varias parcelas adyacentes.

1.2 Procedimiento.

En primer lugar, se debe destacar el tamaño de la red con la que se va a trabajar. Un campo (sector de riego) puede contener fácilmente 900 árboles, siendo el doble el número de goteros. Por ejemplo, la parcela 226 contiene 880 árboles y **1760 goteros**. Esto hace impensable la tarea de dibujar el modelo a mano. Por este motivo se ha propuesto realizar un programa auxiliar que facilite esta tarea.

El procedimiento a seguir se define mediante los siguientes puntos:

- a) Recabar la información disponible sobre la red real.
- b) Crear un programa que permita generar la red en un simulador informático.
- c) Desarrollar el modelo informático, comparando los resultados obtenidos con los datos de la red real.
- d) Proponer una ampliación de la red para el riego de nuevas parcelas.

La información disponible se obtendrá tanto de la información inicial en formato papel proporcionada por el dueño de la instalación como por la información recolectada en las visitas que fueran necesarias a los campos. Todo ello debe permitir generar un modelo informático que sea equiparable con la red real.

Para crear el modelo informático será necesario crear un pequeño programa que genere la red de tuberías y goteros en cada uno de los campos y parcelas objetivo del estudio. Desarrollar el modelo a mano se plantea casi imposible dado el gran número de conexiones existentes. Por ello, mediante un código sencillo programado en C se generarán de forma semiautomática las redes de riego, a partir de las coordenadas que definen cada una de las parcelas.

Una vez se haya realizado el modelo y se haya obtenido el cálculo satisfactoriamente, se deberá comprobar que los resultados obtenidos son coherentes y se corresponden con las mediciones obtenidas en el campo (red real).

Para ello se realizarán mediciones sobre la red en funcionamiento y se compararán con los cálculos obtenidos en el modelo informático.

Llegados a este punto se propondrá una mejora en la red para la incorporación de elementos de medición e instrumentación que permitan un mejor control de la red. Así mismo se generará el modelo informático para los campos de ampliación de la red solicitados.

1.3 Herramientas.

Tanto para la obtención de los datos iniciales como para el desarrollo del proyecto se van a utilizar las siguientes herramientas informáticas:

a) Visor Sigpac Ref [1]:

Sistema de información geográfica de parcelas agrícolas. Mediante este programa se obtendrán todas las coordenadas geográficas reales de la red y a partir de estas se va a generar el modelo del campo. Es importante destacar que no se podrán obtener los datos de cotas sobre el nivel del mar a partir de este programa.

b) EPANET Ref [2]:

Epanet es un simulador de redes hidráulicas muy potente que presenta una gran cantidad de ventajas por las que se ha elegido como programa de cálculo.

-Permite manipular la red en formato de texto (archivo “.inp”), facilitando la incorporación de los datos obtenidos por el programa creado para generar el modelo.

-Es un programa gratuito, lo que permite la descarga del programa, manuales, tutoriales y todo tipo de ayuda que pudiera ser necesaria.

-Es un programa sencillo y con visualización gráfica de la red, lo que ayuda a la comprensión de la misma.

-Permite la simulación de los elementos “Goteros” (Emisores) modelados mediante dos coeficientes.

c) MinGW Ref [3]:

Programa para la compilación de código en lenguaje C. Para la generación del programa auxiliar con el que se generará la red de riego.

2. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN

En este apartado se presentará la instalación actual sobre la que se va a trabajar. Para ello es necesario definir el emplazamiento de la instalación, el uso al que está destinado y a configuración de riego adoptada.

2.1 Emplazamiento.

Los terrenos se encuentran en el municipio de Calatorao a 51 km al suroeste de Zaragoza, y a 38 km de Calatayud.

En la **Figura 1** obtenida del visor Sigpac Ref [1], se pueden observar la localización de Calatorao ubicada aproximadamente a medio camino entre Zaragoza y Calatayud. En el **plano 1** adjunto de este proyecto se puede observar con más detalle el emplazamiento exacto.

La presencia del río Jalón permite la existencia de una gran cantidad de cultivos de regadío en la zona destinados a frutales. En particular, los terrenos objeto de este proyecto, se destinan al cultivo de distintas variedades de melocotón.

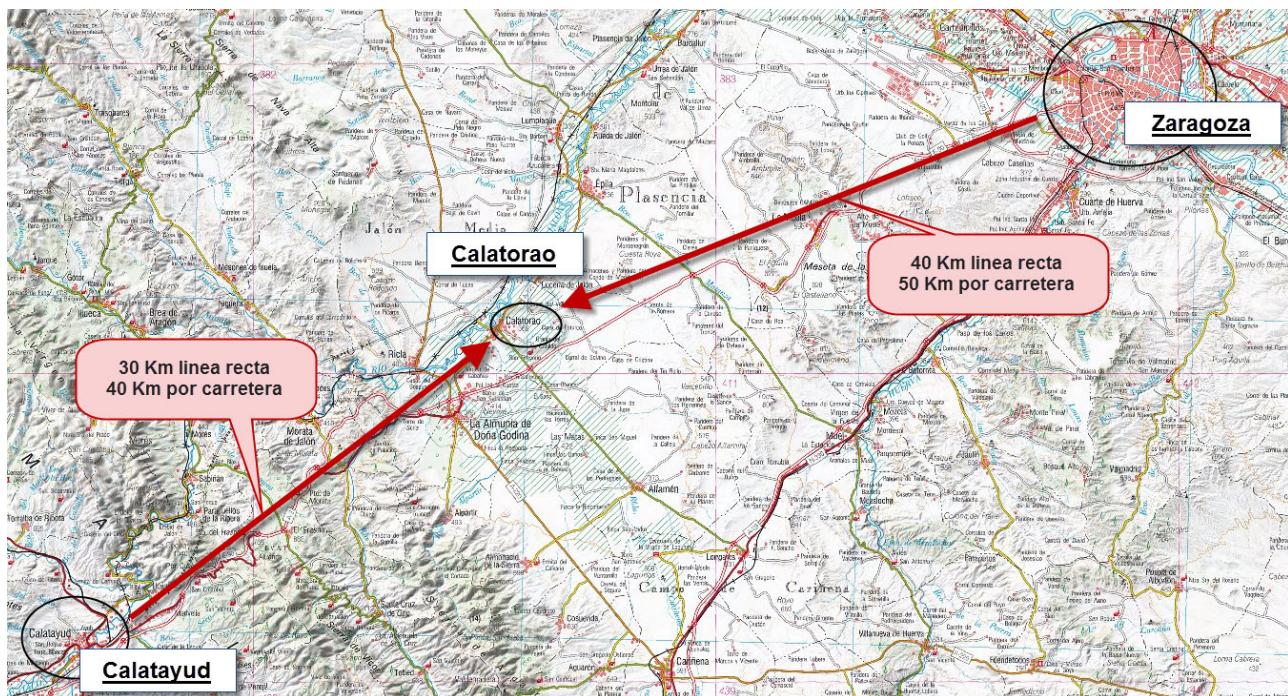


Figura 1. Emplazamiento de la Instalación.

2.2 Sectorización.



Figura 2. Parcelas y numeración.

Número de Parcela	Parcela SIGPAC	Superficie [ha]	Usos permitidos SIGPAC	Red de riego
1	226	1.2813	Frutales	Red Instalada
2	225	1.4513	Frutales	Red Instalada
3	181	0.5216	Frutales	Red Instalada
4	180	0.5167	Frutales	Red Instalada
5	223	1.1245	Frutales	Red Instalada
6	222	0.4963	Frutales	Red Instalada
7	242	0.5917	Frutales	Red Instalada
8	224	1.6832	Frutales	Red Instalada
9	240	0.5932	Frutales	Red Instalada
10	253	0.5551	Frutales	Red Instalada
11	234	1.9898	Frutales	Red Instalada
12	235	2.1778	Tierras Arables	Pendiente Ampliación
13	208	1.9739	Tierras Arables	Pendiente Ampliación
14	291	0.5820	Tierras Arables	Pendiente Ampliación
15	209	0.6159	Tierras Arables	Pendiente Ampliación

Tabla 1. Datos parcelas.

En la **Figura 2** podemos apreciar la distribución de las parcelas objeto de este proyecto. En la tabla 1 se define el número de parcelas sobre el que se trabaja, el área de esta y su uso permitido.

Como puede apreciarse, existe una instalación que cubre las 11 primeras parcelas y se desea realizar una ampliación sobre las parcelas 12, 13, 14 y 15.

La instalación dispone de aproximadamente 16 hectáreas de terrenos repartidos en sectores de riego. Dado que la sectorización realizada por el gobierno (Sigpac **Ref [1]**) no se corresponde con la sectorización realizada para la instalación de riego, se van a definir dos términos importantes para la correcta comprensión del presente proyecto.

a) Parcela:

Se denominará Parcela a la sectorización realizada por el gobierno y que puede consultarse a través de la aplicación Visor Sigpac **Ref [1]**. Cada parcela tiene una designación de uso, un área definida y una numeración única para referenciarla.

b) Campo:

Se denominará Campo al sector de riego unitario. Una parcela puede estar subdividida en varios campos, o pueden agruparse parcelas para formar un campo.

La necesidad de realizar campos de riego es debida a dos criterios:

a) Por geometría:

Las geometrías que pueden definir las parcelas pueden ser muy irregulares, obligando a crear redes de riego complicadas y con un coste más elevado que el correspondiente a unir dos parcelas.

b) Por área de riego:

Se busca que el área de los campos (sector de riego) sea lo más regular posible, de forma que el sistema de gestión de riego pueda activar y desactivar campos y que el consumo total de la bamba sea el mismo (riego constante de 1,5 hectáreas).

Una vez comprendido este paso, como se aprecia en la **Tabla 2**, se ha establecido una correspondencia entre parcelas y campos. A partir de este momento se van a tratar únicamente los campos. En esta tabla se ha incluido el número de árboles instalados en cada campo, así como el número de vértices con el que se va a definir la geometría del mismo. Las coordenadas de los vértices se han obtenido a través de la aplicación Visor Sigpac **Ref [1]** y dado que es un parámetro básico para el cálculo, se ha añadido en el **ANEXO I** de esta memoria. Cualquier cambio en estos datos podría modificar los resultados obtenidos.

En la tabla 2 faltan por incluir las parcelas 12, 13, 14 y 15 dado que no se han definido aún las sectorizaciones de riego. Este paso se hará más adelante presentando la solución final.

2.3 Instalaciones.

Nº Campo	Designación	Parcela/Parcelas	Nº de Arboles Teóricos	Nº Vértices
1	1	226	880	9
2	2	225	930	8
3	3	181	350	8
4	4	180	320	5
5	5a	223/222/224/240/242	1320	7
6	5b	223/222/224/240/242	1320	6
7	6a	253	165	4
8	6b	253	165	5
9	7a	234	200	4
10	7b	234	460	5

Tabla 2. Distribución de campos

2.3 Instalaciones.

Para facilitar la comprensión de la instalación, se ha dividido la instalación en dos conjuntos diferenciados.

a) Red de abastecimiento:

La red de abastecimiento, como se deduce de su nomenclatura, es la encargada de proporcionar el agua de riego en la presión y caudal necesarios a cada campo.

En este conjunto se engloba el pozo del que se alimenta la instalación, la bomba y la red de distribución general.

b) Red de riego local:

La red de riego es la que se encarga de distribuir (y regar) correctamente cada campo. De este modo dos campos adyacentes son independientes en cuanto a la red de riego local.

En este conjunto se incluyen la tubería de distribución central, los ramales porta-goteros y los goteros propiamente dichos.

En la figura 3 se ha representado de forma esquemática la distribución de la red, mostrándose en rojo la red de abastecimiento y en azul la red de riego. Como se ha indicado, la red de abastecimiento tiene la finalidad de alimentar cada una de las redes de riego locales en cada campo.

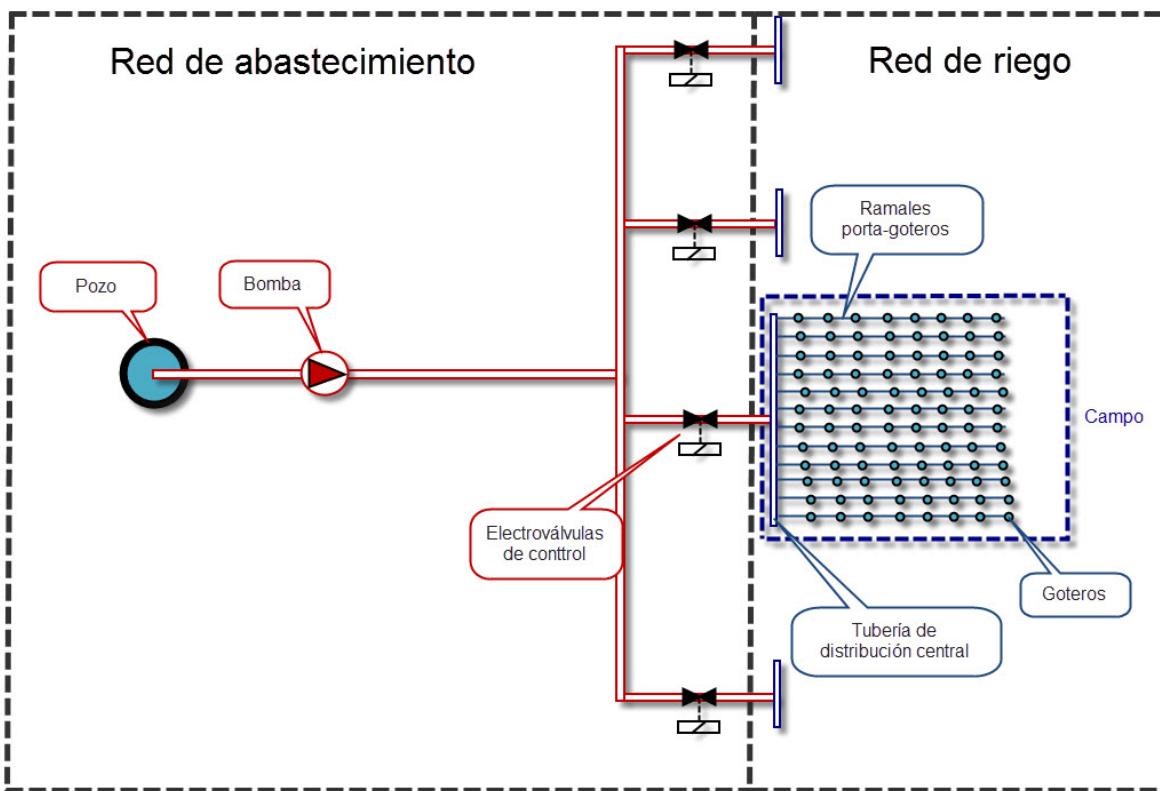


Figura 3. Configuración de la red.

2.3.1 Red de abastecimiento.

La red de abastecimiento se define en tres puntos: configuración del pozo de abastecimiento, parámetros de la bomba y red de distribución general. En la figura 4 se puede apreciar cual es la configuración de la instalación de abastecimiento.

A partir de este momento, como se indica en la figura 4, consideraremos cota 0 el nivel del suelo donde se halla el motor que mueve la bomba sumergida. Se obtendrán las cotas de todos los puntos de la red a partir de esta referencia.

Tras esta consideración, se tiene un pozo con una profundidad máxima de 57 metros bajo el nivel de cota 0, con un nivel de pozo variable en función de si se está regando o no. Para simplificar los cálculos, se considera que el nivel de pozo es fijo y se encuentra a una cota de -22 metros.

La bomba está sumergida en el pozo y movida desde la superficie mediante un motor de gasoil. La cota de captación de la bomba coincide con la propia bomba y se encuentra a una cota de -47 metros.

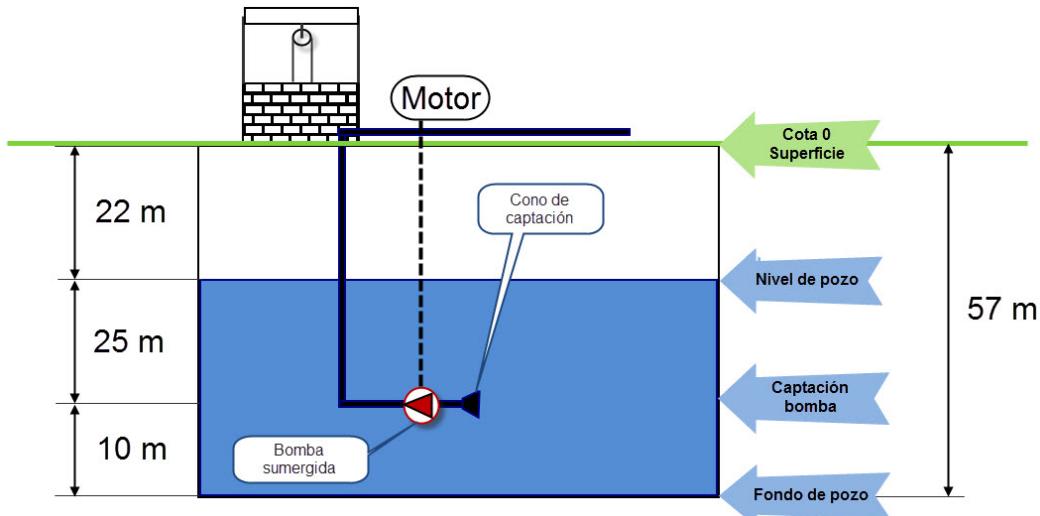


Figura 4. Red de abastecimiento.

Para poder definir correctamente la bomba, a parte de las alturas de entrada y salida, es preciso conocer su curva de funcionamiento. Para ello, a partir de las referencias de marca y modelo, se han obtenido las curvas de la bomba del fabricante: **Rovatti pompe 6V23/8 Ref [4]**.

El fabricante aporta las curvas a distintas revoluciones y para distintas configuraciones de accionamiento. En la instalación estudiada se conoce que las revoluciones de la bomba son de aproximadamente 1570 rpm. Para estas revoluciones no se ofrece curva característica de la bomba, por lo que se ha procedido a obtenerla a partir de números adimensionales ecuación (1) y ecuación (2). Los resultados se muestran en la **tabla 3** y en la **figura 5**.

$$H' = H * \left(\frac{N'}{N} \right)^2 \quad (1)$$

$$Q' = \sqrt[2]{Q^2 * \frac{H'}{H}} \quad (2)$$

Curva característica de la bomba: 6V23/8

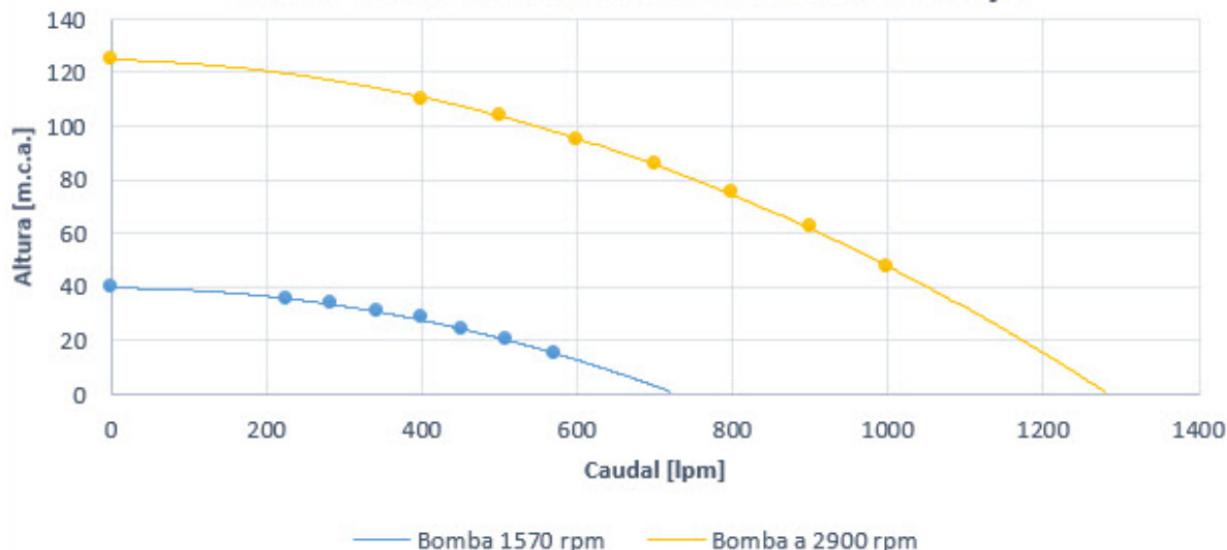


Figura 5. Curva característica de la bomba.

Rovatti pompe 6V23/8

2900 RPM		1570 RPM	
H [mca]	Q [Lpm]	H [mca]	Q [Lpm]
125,00	0,00	39,64	0,00
110,00	400,00	35,24	226,40
104,00	500,00	33,48	283,70
95,00	600,00	30,84	341,88
86,00	700,00	28,21	400,88
75,00	800,00	23,98	452,38
62,00	900,00	19,92	510,16
47,00	1000,00	15,28	570,09

Figura 5. Curva característica de la bomba.

Por último, la tubería de abastecimiento es la encargada de distribuir a cada campo (sector de riego) el agua en las condiciones necesarias de presión y caudal. Una serie de electroválvulas colocadas a la entrada de cada campo sectorizan la red de riego. La tubería de abastecimiento tiene las siguientes características.

- a) Diámetro: **90 mm**.
- b) Material: **PVC**.
- c) Coeficiente de pérdidas (Darcy-Weisbach): **0.0025 mm** (**Ref [6]**).

2.3.2 Red de riego.

Como se ha indicado con anterioridad, la red de riego está constituida por 3 elementos básicos: tubería central, tubería porta goteros y goteros.

Por regla general, la electroválvula de sectorización de los campos está conectada a la tubería central aproximadamente en el centro de cada campo. De esta manera se pretende equilibrar las pérdidas lineales existentes en el circuito al igualar las distancias con respecto de la bomba de las puntas de los campos.

En la figura 6 se puede observar un detalle del esquema de la instalación en cada campo. Se considera red de riego (red local a cada campo) siempre tras la electroválvula de control. A partir de este punto la presión se distribuye de manera lo más homogéneamente posible por la tubería central. Esta a su vez alimenta las tuberías portagoteros que se extienden a lo largo de todo el campo.

Cada tubería portagoteros está separada de la siguiente según las especificaciones del marco de plantación indicadas para cada campo. Se puede observar el detalle del marco de plantación en los **planos 4.2 y 5.2** en los que el marco de plantación se corresponde con un encuadre de 3 x 5 metros.

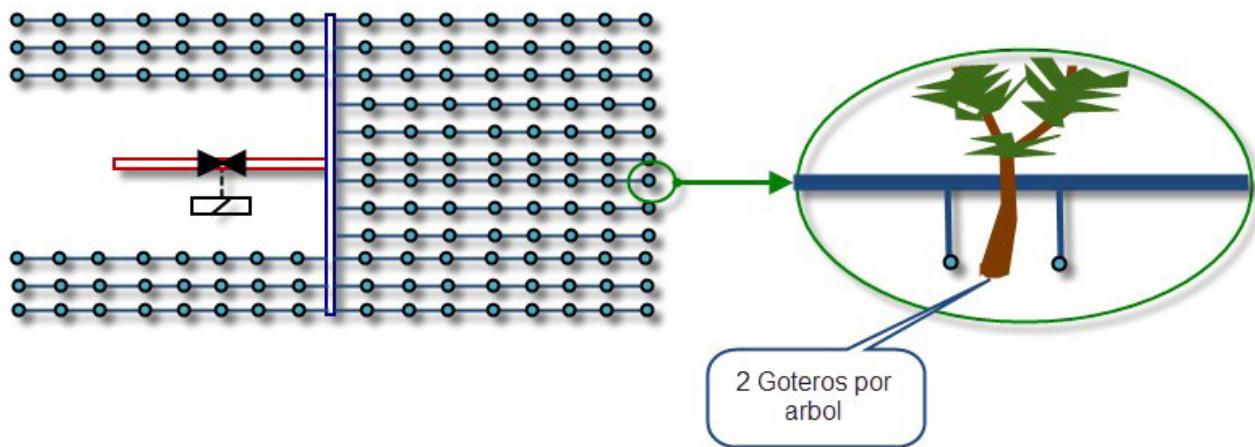


Figura 6. Red de riego.

La tubería central tiene las siguientes características:

- Diámetro: 63 mm.
- Material: PVC.
- Coeficiente de pérdidas (Darcy-Weisbach): 0.0025 mm (Ref [6]).

A lo largo de la tubería portagoteros se van colocando los goteros que se encargan de regar cada uno de los árboles de la instalación. Como se aprecia en el lado derecho de la Figura 6, cada punto corresponde a un árbol, a su vez, cada árbol cuenta con 2 goteros, uno a cada lado del mismo.

Considerando el marco de plantación especificado de 3x5 metros, cada árbol estaría a 3 metros del siguiente, y en cada árbol se cuenta con dos goteros separados entre sí 20 cm. Por lo tanto, las distancias reales entre goteros se corresponderán con 0.20 m y 2.8 m a pares entre sí.

La tubería portagoteros tiene las siguientes características.

- a) Diámetro: **16 mm**.
- b) Material: **Polietileno de baja densidad**.
- c) Coeficiente de pérdidas (Darcy-Weisbach): **0.0025 mm (Ref [6])**.

Llegados a este punto solo queda por caracterizar el funcionamiento de los goteros. Esquemáticamente, un gotero es un punto de descarga a la atmósfera. Este tipo de elementos puede modelarse con una buena aproximación mediante una curva exponencial obteniéndose los valores del coeficiente de descarga y el exponente de la curva.

Los goteros utilizados en la presente instalación se corresponden con unos **RainBird PC-10**. Son goteros autocompensantes que trabajan a caudal prácticamente constante a partir de 1 bar de presión. En la **Figura 7** se presentan las curvas obtenidas para los goteros PC-10 y PC-20 de la documentación técnica aportada por fabricante **Ref [6]**, y la curva de aproximación obtenida para la implementación matemática del modelo con la estructura de la ecuación (3).

Modelo:

$$Q = C_{emisor} \cdot H^{E_{emisor}} \quad (3)$$

- $C_{emisor} = 0.0533 \left[\frac{LPM}{\sqrt{m.c.a.}} \right]$
- $E_{emisor} = 0.0744$
- Q: Caudal en Litros por minuto.
- H: Presión en metros de columna de agua.

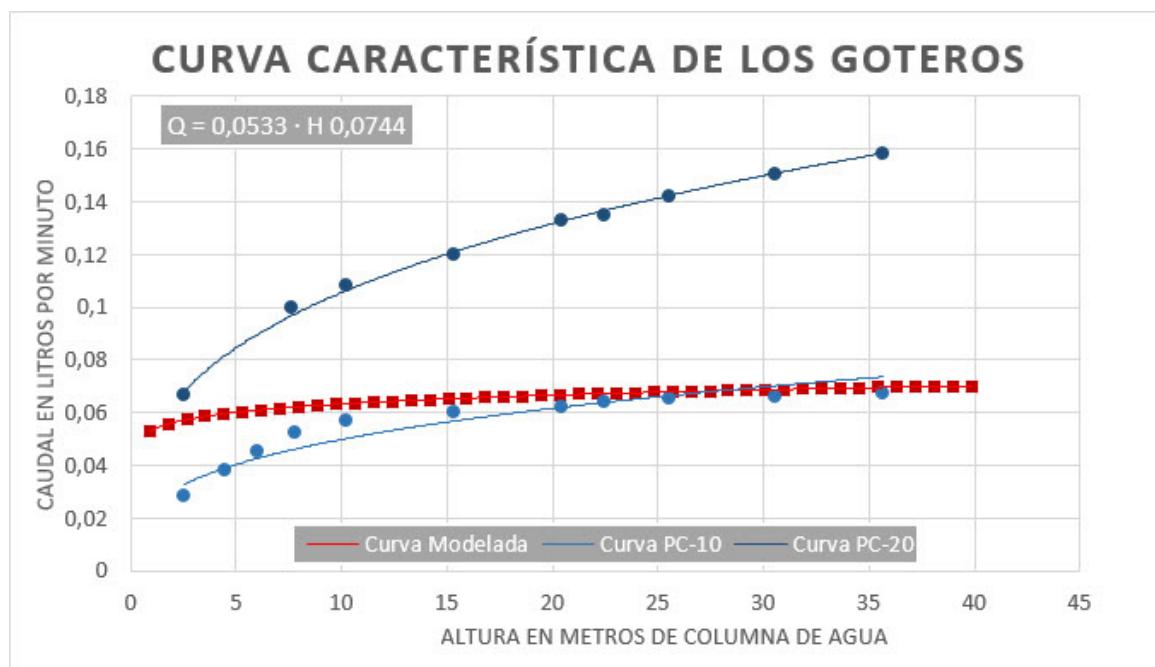


Figura 7. Curva característica de los goteros.

3. GENERACIÓN DEL MODELO

Para la generación del modelo, como se ha adelantado en la introducción, se ha elegido utilizar el programa EPANET Ref [2] por varios motivos.

El principal motivo es que EPANET es un programa gratuito de la EPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos) ampliamente utilizado y con una sólida prestigio y fiabilidad.

Además, es importante el hecho de que permita trabajar con archivos de texto en formato “inp” ya que esta característica permitirá la realización de cambios en el archivo del cálculo de forma rápida y sencilla.

Para la explicación del modelo se ha elegido dividir este apartado en tres fases:

- a) Explicación del modelo en EPANET.
- b) Funcionamiento del programa de generación de modelos.
- c) Resultados obtenidos tras el cálculo.

En la primera parte se debe detallar el modo de funcionamiento del programa. EPANET es un programa muy potente con una gran capacidad de cálculo. Principalmente es utilizado en modelos donde se necesita conocer la calidad del elemento fluido y cómo evoluciona tanto en la instalación (posición) como en el tiempo.

En esta ocasión se aprovechará el programa para calcular el equilibrio de la red de riego, teniendo como parámetros de entrada todos aquellos descritos en el apartado 2 de esta memoria. Del cálculo obtenido se obtendrá la presión y caudal en cada punto de la instalación que permitirá optimizar el funcionamiento de la misma. Es importante verificar que todos los goteros funcionan en el rango de presiones designados por el fabricante y que el caudal de cada uno de ellos se corresponde con el deseado.

3.1 Descripción del modelo de EPANET.

EPANET presenta una interfaz gráfica muy intuitiva. Para la realización de los modelos se dispone de diferentes elementos mediante los cuales se es capaz de dibujar una gran cantidad de circuitos hidráulicos:

- a) Nodos.
- b) Líneas.
- c) Depósitos.
- d) Embalses.
- e) Bombas.
- f) Válvulas.

La elaboración del modelo es muy simple, se dibujan nodos y entre dos nodos se dibuja una línea, se repetirá esta acción por cada nodo y línea de la instalación. Como elemento de almacenaje inicial (pozo) se coloca un depósito al cual se le pueden asignar la cota del nivel del agua (-22 metros) **Figura 8**. Y como elemento de bombeo se coloca una bomba.

Como puede apreciarse en la Figura 8, para conectar la al depósito se colocan nodos auxiliares que solo cumplen la función de “contener” la línea de unión entre estos elementos. Esta acción se repite durante todo el modelado ya que, para trazar una bifurcación de una tubería, es necesario hacerlo desde un nodo.

Como se ha explicado en el apartado de la descripción de la instalación, existen dos circuitos diferenciados: Abastecimiento y Riego.

La red de abastecimiento, dada su baja complejidad se realizará manualmente (dibujando nodos y líneas) en la interfaz gráfica de EPANET, sin embargo, la red de riego se realizará mediante un programa que automáticamente (y a partir de una geometría definida) cree un “mallado” de la zona con nodos y líneas.

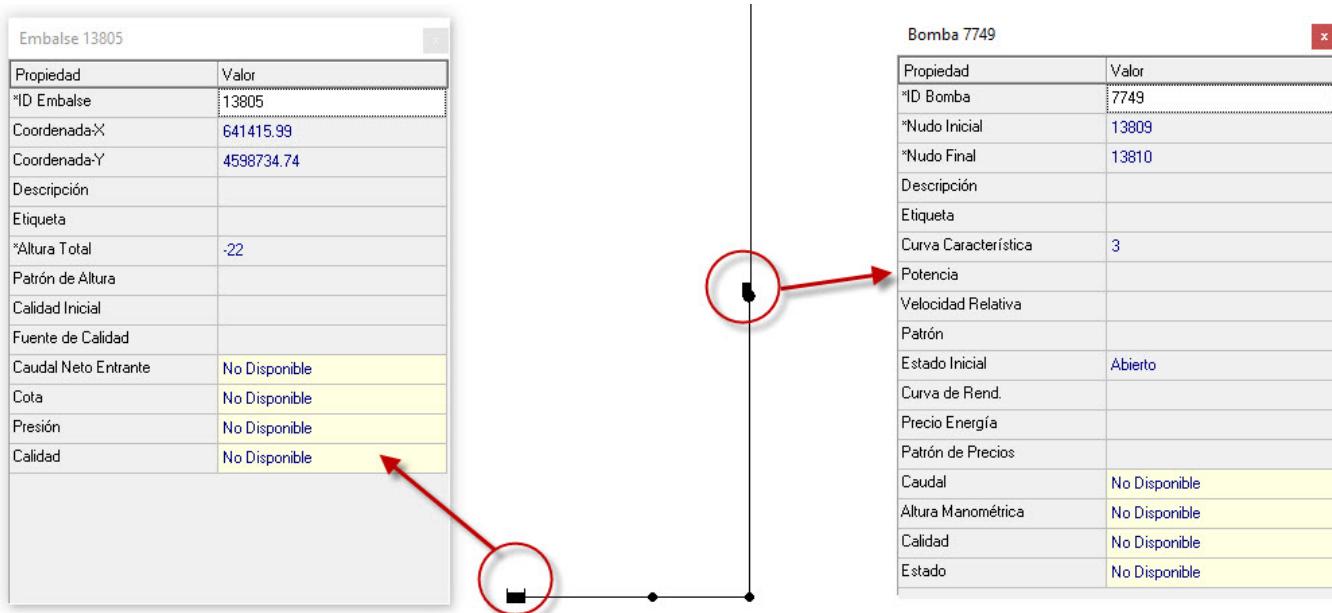


Figura 8. Elementos EPANET. Bomba y Deposito.

Para poder realizar la red de riego es necesario entonces familiarizarse con la interfaz textual del programa (inp).

En la **Figura 9** se muestra como representa EPANET las líneas y nodos del modelo. Como se puede observar es preciso definir todas las variables que caracterizan esos elementos.

a) Nodo.

Como ya se ha indicado, un nodo puede ser un elemento de paso o un elemento de consumo. Por ello, un nodo está definido por 3 características:

1. Identificación del nodo, número o nombre del elemento (también puede asignarse un nombre).
2. Elevación del nodo, dado por su cota respecto a la referencia que se desee.
3. Demanda base, a partir de la cual se calculará el consumo de los diferentes elementos. Es una condición de contorno impuesta en el momento inicial.

b) Línea.

Una línea para EPANET es una tubería, la cual puede actuar también como válvula si se le indica que está cerrada o como válvula de retención si se le indica que es unidireccional.

La definición de una línea consta de las siguientes características:

1. Identificación de la línea, numero o nombre de tubería.
2. Nodos entre los que se forma la tubería “nodo inicial” y “nodo final”. En caso de definir una la línea como unidireccional es importante definir correctamente el orden de los nodos, para los demás casos no será relevante.
3. Longitud, indispensable para poder calcular las pérdidas asociadas a la línea. No tiene por qué coincidir con la longitud dibujada en el plano.
4. Diámetro, parámetro básico para el cálculo de flujos en tuberías.
5. Rugosidad, dependiendo del modelo elegido (Darcy-Weisbach, Hazen-Williams o Manning) para el cálculo de las pérdidas se elegirá de las tablas del manual de EPANET **Ref [6]** el parámetro correspondiente.
6. Pérdidas menores, pérdidas de la tubería asociadas a codos, giros y elementos intercalados en la misma. EPANET facilita una tabla de valores para cada situación en su manual **Ref [6]**.
7. Estado, referido a “abierta”, “cerrada” o “unidireccional”, cuando definamos una tubería como válvula.

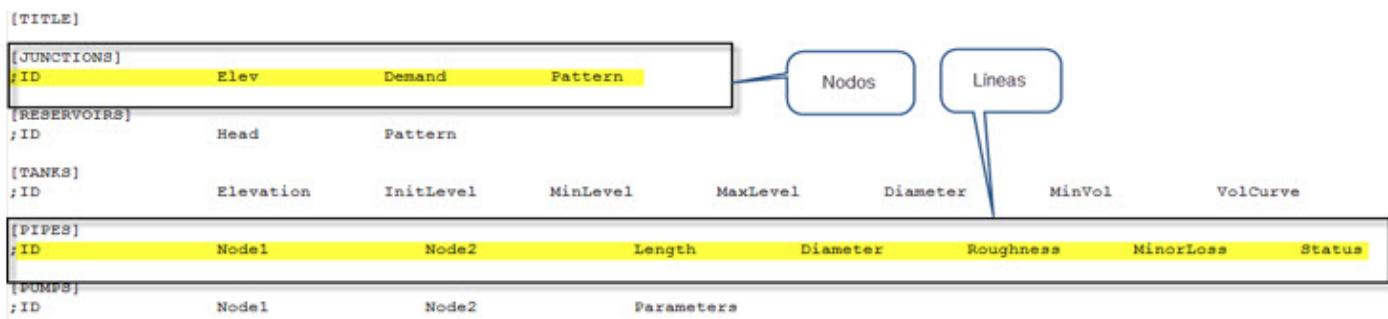


Figura 9. EPANET. Líneas y Nodos

c) Goteros.

A partir de la información de un nodo se puede generar un emisor o gotero. Para ello, identificando dicho nodo en este apartado, se pueden definir las características del emisor.

Dado que la base de este proyecto es modelar los goteros, habrá que ir añadiendo nodos y definiéndolos como goteros Figura 10:

1. Identificación del nodo, haciendo referencia a un nodo ya generado.
2. Coeficiente de descarga del emisor o gotero.

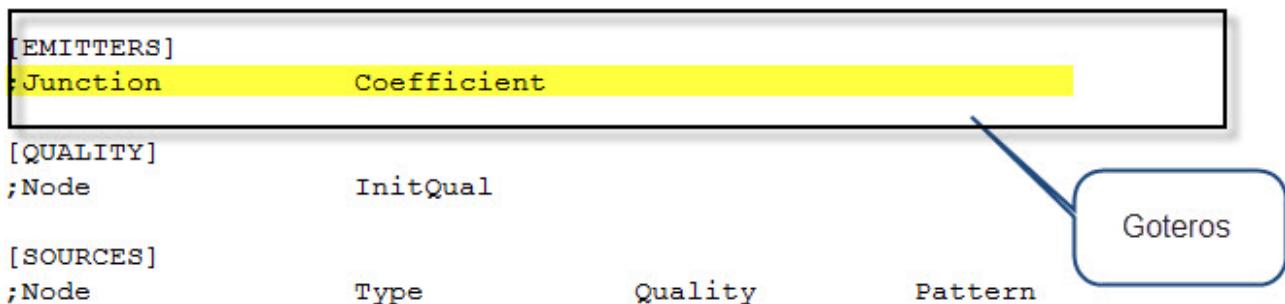


Figura 10. EPANET. Goteros.

d) Coordenadas.

Por último, es necesario definir el lugar físico que ocupa cada uno de los elementos dibujados (nodos y líneas en este caso) para que al abrir la interfaz gráfica los genere.

Para simplificar los cálculos, en el presente proyecto se ha decidido trabajar con coordenadas reales para todos los cálculos. De este modo, asignando un solo valor (coordenadas espaciales X, Y, Z) se es capaz de calcular distancias entre nodos y con ello, longitudes de tuberías.

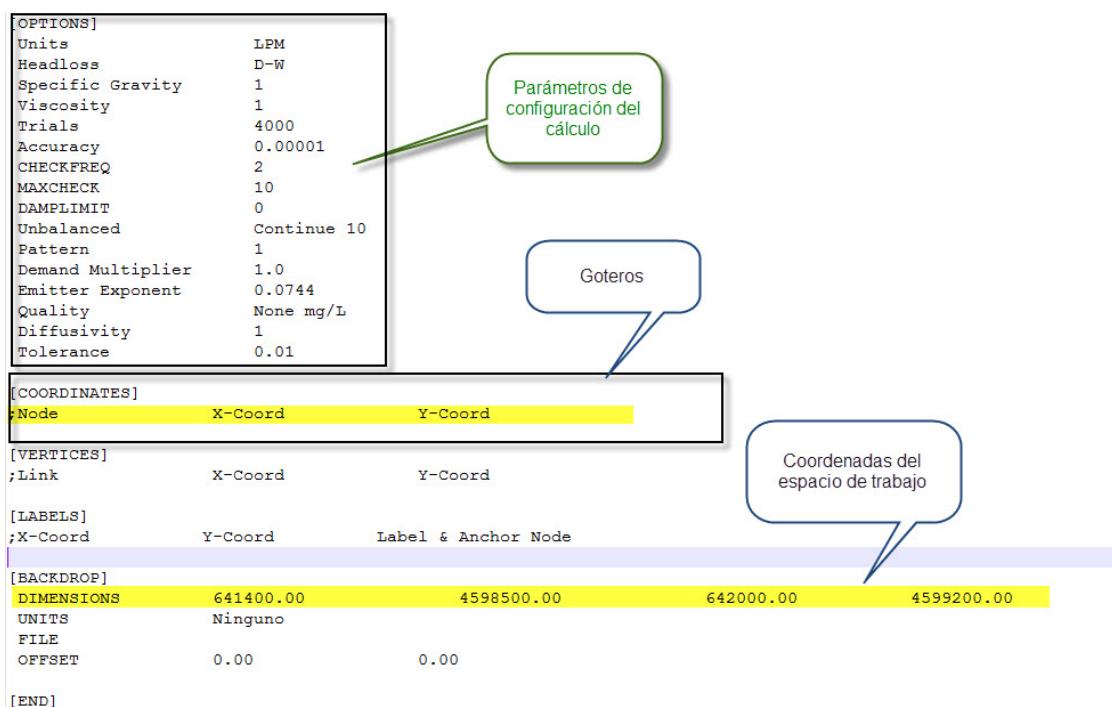


Figura 11. EPANET. Coordenadas y Configuración.

Teniendo en cuenta estas indicaciones, se va a crear un programa auxiliar capaz de generar las líneas y goteros necesarios para definir la red de riego de cada campo. Así mismo debe ser capaz de asignar todos los atributos y características necesarias, y de la forma correcta, para que se pueda realizar el cálculo.

3.2 Programa auxiliar en C.

En este apartado se va a explicar de forma breve el funcionamiento del programa auxiliar que genera los campos. Se ha decidido que la forma más práctica de exponer el funcionamiento del mismo es a través de un diagrama de bloques, al que se agregarán una serie de figuras para reforzar la explicación. No obstante, se ha añadido el código del programa con los comentarios necesarios para su comprensión en el ANEXO III de este proyecto.

Para la explicación del diagrama se procederá con un breve ejemplo descriptivo.

a) Ejecutar programa y obtención de los datos.

En el primer paso del programa cargamos todos los datos necesarios para ejecutar el código.

1. Número de campos y número de puntos que forman el polígono de cada campo.
2. Coordenadas de los puntos que forman el polígono “Campo” (x, y, z).
3. Coordenadas de los puntos inicial y final por donde pasa la tubería central (x_i, y_i, x_f, y_f).
4. Configuración del marco de plantación en cada campo.

b) Creación del campo (creación del primer campo).

En el segundo paso del diagrama de bloques (y del programa), se crea virtualmente el primer campo al que se le asignará el primer punto (x_i, y_i) de dicho campo y un ángulo de avance (α) por donde discurrirá la tubería central del campo (Figura 12).



Figura 12. Paso 1. Creación del Campo.

c) Inicio del bucle de nodos centrales.

Seguida de la creación (virtual) del campo, se construye el primer nodo central de la red desde el punto inicial, con un avance igual a la separación mayor de los árboles (marco de plantación), y con un ángulo de avance igual a α . Este nodo corresponde a un nodo de paso, por lo tanto, no tendrá consumos ni propiedades de gotero.

Acto seguido a la creación del nodo, se comprueba si dicho nodo está dentro del campo (dentro del polígono). En caso de que sí, continua hacia abajo, en caso de que no, crea el siguiente nodo central y repite la comprobación.

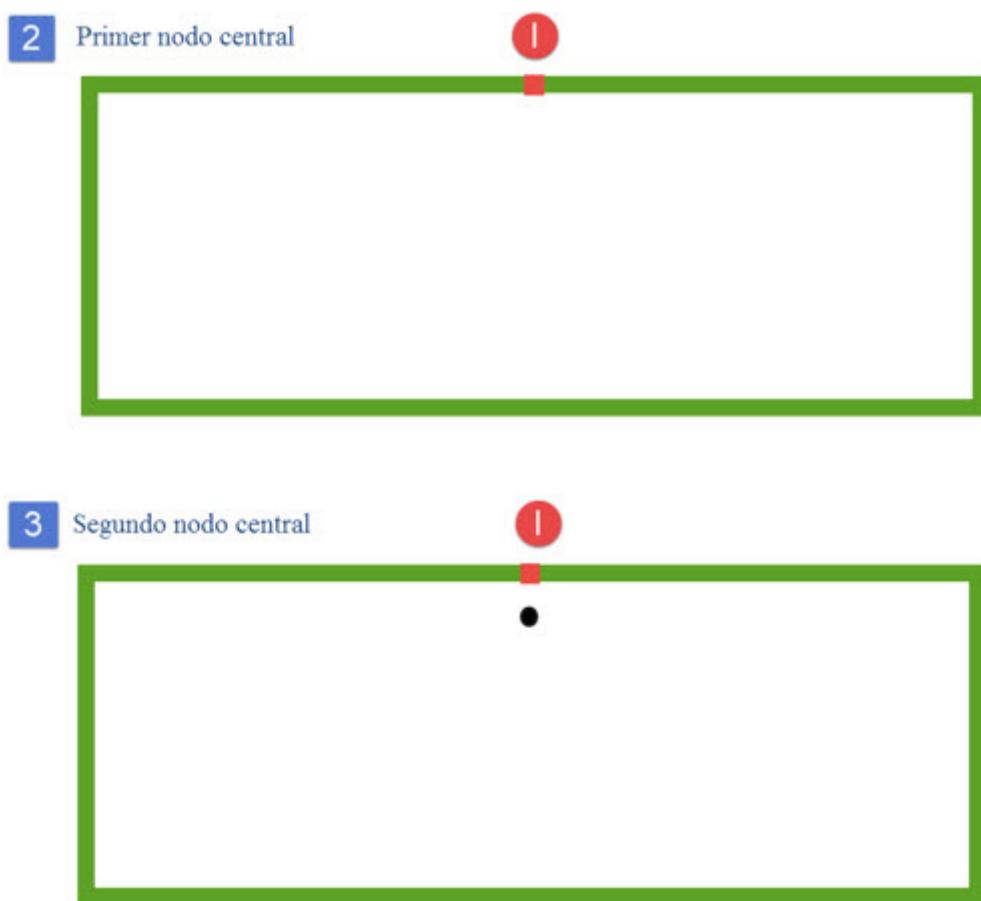


Figura 13. Pasos 2 y 3. Primer y segundo nodo central.

d) Inicio del bucle goteros.

Una vez se dispone de un nodo central dentro del campo, se procede a calcular las tuberías portagoteros. Para ello, con un ángulo β a 90° del ángulo α del campo y con un avance definido por el marco de plantación (separación menor de las dos), se calcula el primer nodo Gotero.

De igual modo que en el caso de los nodos centrales, lo primero es comprobar si dicho nodo está dentro del campo. Si el nodo está en el interior del campo, se le conceden las propiedades correspondientes de gotero, se calcula la distancia con el nodo anterior y se dibuja la tubería portagoteros entre el gotero y la tubería central. Esto solo es aplicable en el primer nodo gotero de cada línea, ya que los demás se comunicarán entre sí (Nodo i, Nodo i-1). La altura del nodo se calcula como media ponderada entre las alturas de los nodos que definen las esquinas del campo y la inversa de la distancia del nodo a cada esquina del campo.

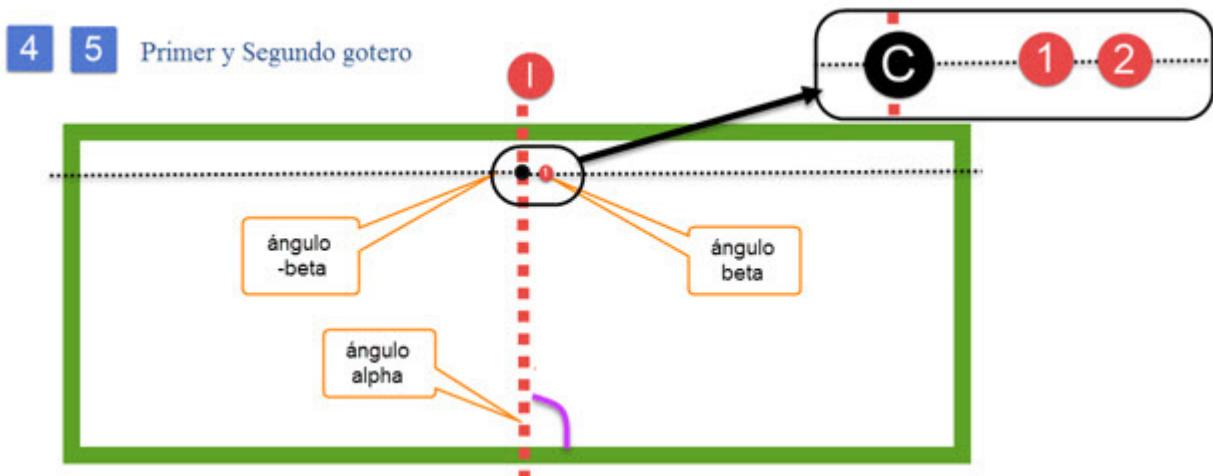


Figura 14. Pasos 4 y 5. Primer y segundo goteros.

e) Final del 1º bucle de goteros. Inicio del 2º bucle de goteros.

El bucle termina cuando se ha recorrido toda la línea definida como el encuadre transversal. Llegados a este punto se retorna al nodo central y, girando el ángulo β 180º, se traza la línea de goteros simétricamente a la que se acaba de trazar.

Los pasos c), d) y e) se repiten hasta completar campo con todas las líneas y nodos posibles. Cuando el primer campo se completa, se pasa al siguiente repitiendo el proceso desde el punto b).

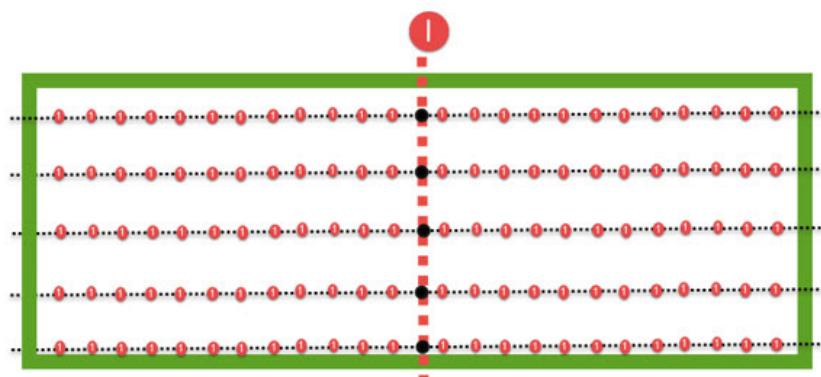
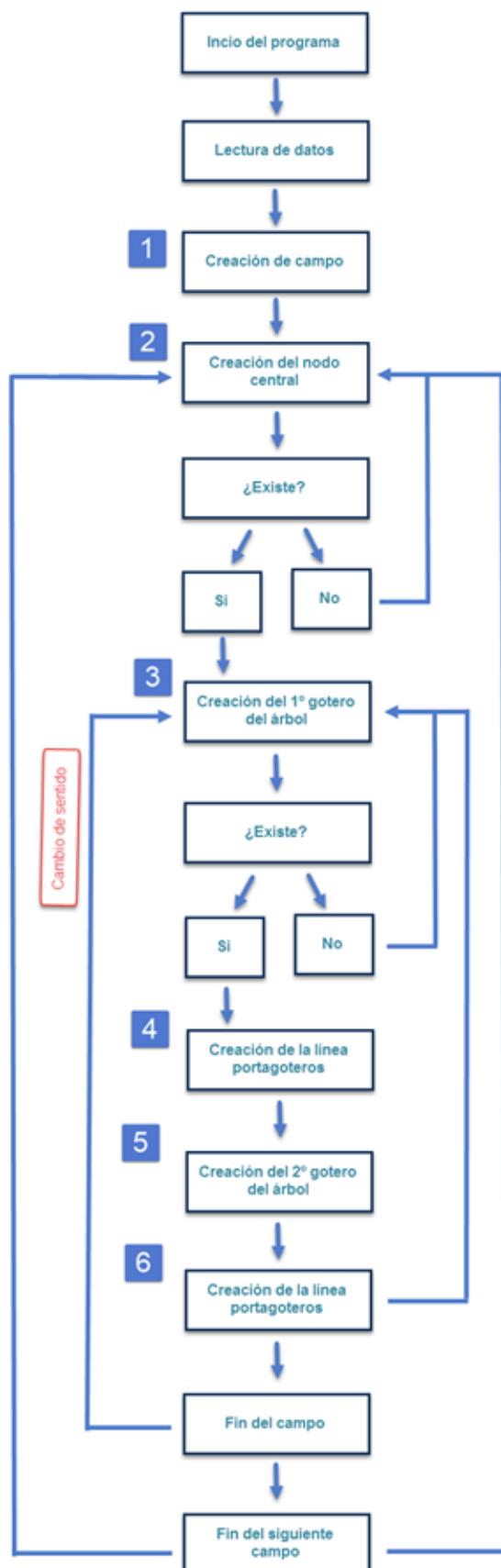


Figura 15. Final del campo 1.



3.3 Resultados obtenidos.

Tras haber realizado el modelo del campo y ejecutado la simulación se han obtenido los resultados de la misma. Como punto de control para comprobar los resultados, se conoce la presión en el punto más desfavorable de la instalación. A parte de este indicador, es necesario que el caudal de los goteros sea el correcto y homogéneo en cada campo.

Campo	Nodo más desfavorable	Posición del nodo más desfavorable	Presión real [m.c.a.]	Presión simulación [m.c.a.]	Caudal Real [l/s]	Caudal simulación [l/s]
1	1753	Esquina superior	> 10	12.12	≈ 4	3.6
2	1903	Esquina superior	> 10	11.07	≈ 4	3.6
3	185	Esquina superior izquierda	> 10	16.6	≈ 4	3.6
4	633	Esquina inferior derecha	> 15	17.24	≈ 4	4.2
5.a	99	Esquina superior izquierda	> 8	9.53	≈ 4	3.6
5.b	428	Esquina superior	> 8	9.67	≈ 4	3.6
6.a	348	Esquina inferior derecha	> 10	13.28	≈ 4	3.6
6.b	296	Esquina superior	≈ 15	15.88	≈ 4	4.2
7.a	70	Esquina inferior	> 10	12.97	≈ 4	3.6
7.b	60	Esquina inferior	> 10	13.64	≈ 4	3.6
7.c	1343	Esquina superior	≈ 8	9.34	≈ 4	3.6

Tabla 4. Resultados de la simulación

Como se puede apreciar en la **Tabla 4**, los resultados obtenidos son coherentes y se corresponden con los datos de control que se dispone.

El punto más crítico, como se corresponde con los datos medidos en el campo, se corresponde con el punto más alejado de la bomba. En este punto se suma la elevada cota de la zona con la distancia a la bomba (pérdidas lineales en las tuberías) dando una presión relativamente baja. No obstante, al estar muy cercano a los 10 m.c.a. necesarios para que el gotero funcione correctamente, y al presentar este una curva muy plana, el caudal suministrado por el punto más desfavorable se corresponde con el establecido por el dueño de la instalación.

Hay que destacar que existen pérdidas de precisión tanto al introducir los datos al programa como al extraerlos. De manera que los caudales aquí indicados como 3.6 se corresponden con una salida del programa de 0.06 litros por minuto, donde EPANET no detalla más decimales.

A salvo de pequeñas discrepancias con la precisión de los resultados, se da como válido el modelo creado. Por ello se procede a realizar una propuesta de ampliación de las parcelas adyacentes.

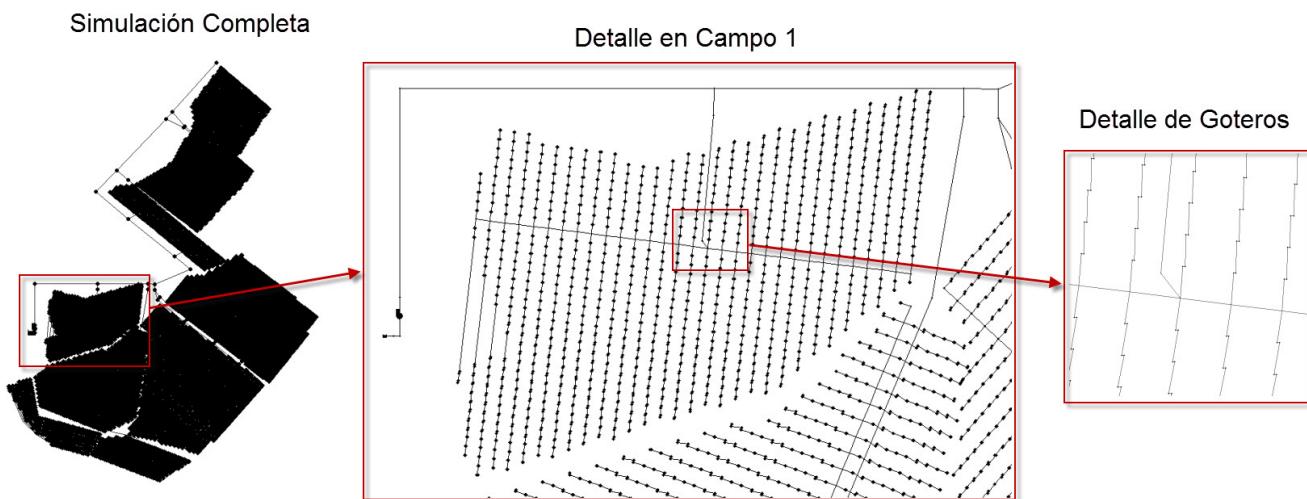


Figura 16. EPANET. Resultados

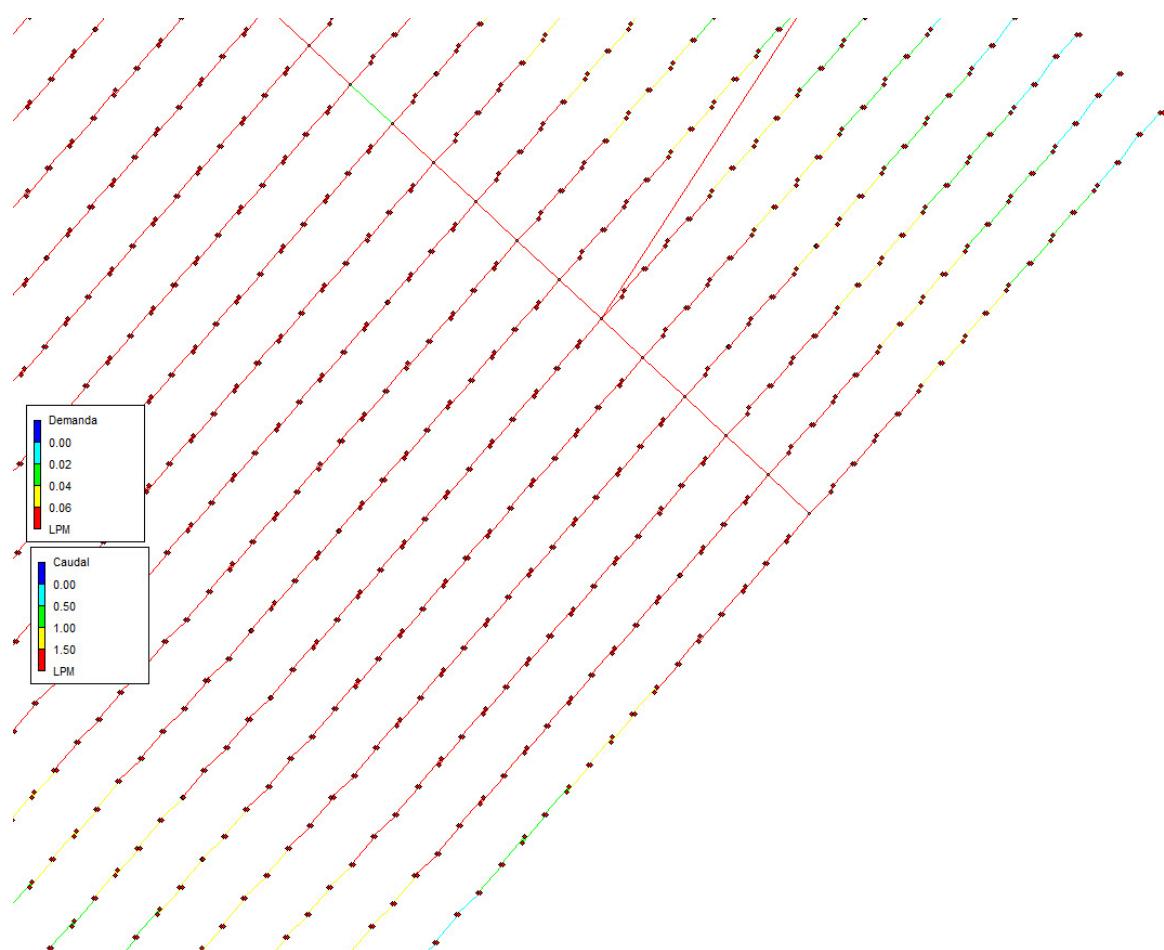


Figura 17. EPANET. Resultados (2).

4. PROPUESTA DE AMPLIACIÓN

Basándonos en la red ya implementada y las indicaciones del dueño de los campos, los campos (sectores de riego) son de aproximadamente 1,5 hectáreas. Por lo tanto, siguiendo con estas indicaciones, se debe plantear una solución para las parcelas restantes coherente con esta información. Los datos de las parcelas, así como de la distribución de los campos en las opciones de 3-Campos y 4-Campos, puede encontrarse en el **ANEXO II** de esta memoria.

Antes de nada, se debe detallar un punto importante a tener en cuenta. Mientras más alejados de la bomba, mayores son las pérdidas lineales acumuladas en la red y por lo tanto más desfavorable será la situación del campo. Además de esto, se debe destacar que las parcelas correspondientes a la ampliación están a una mayor cota que los campos ya instalados. Por lo que será crítico el ajustar correctamente las superficies de los sectores de riego.

La superficie total de los campos de la ampliación es de aproximadamente 5.3 hectáreas, por lo que se puede definir la ampliación en 3 sectores de 1.7 hectáreas o 4 sectores de 1.3 hectáreas.

Se presentan las dos soluciones con sus resultados de los cálculos para que decida el dueño la solución que mejor se adapte a sus necesidades.

4.1 Ampliación en 3 campos.

La ampliación en 3 campos queda definida en los planos 4.1 y 4.2. Como puede apreciarse en ellos se ha aprovechado la geometría irregular de las parcelas para preparar dos bloques diferenciados.

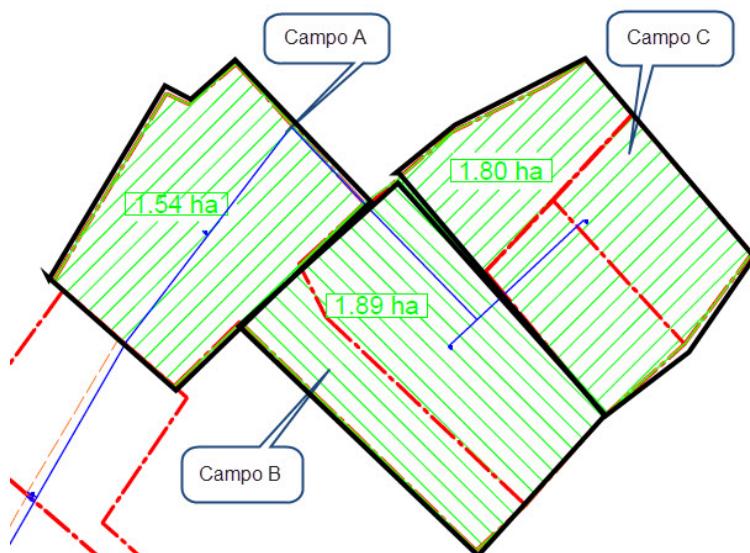


Figura 18. Solución en 3 Campos

Campo A	ID Nudo	Cota [m]	Demanda [Lpm]	Altura [m.c.a.]	Presión [m.c.a.]	
Presión Máxima	Conexión 56	4.91	Área del gráfico	0.06	14.63	9.72
Presión Mínima	Conexión 1858	9.87		0.06	14.6	4.73
Cota Máxima	Conexión 1858	9.87		0.06	14.6	4.73
Cota Mínima	Conexión 56	4.91		0.06	14.63	9.72
Altura total Máxima	Conexión 867	8.14		0.06	14.74	6.59
Altura total Mínima	Conexión 1455	8.29		0.06	14.54	6.26

Tabla 5. Resultados Campo A (3C).

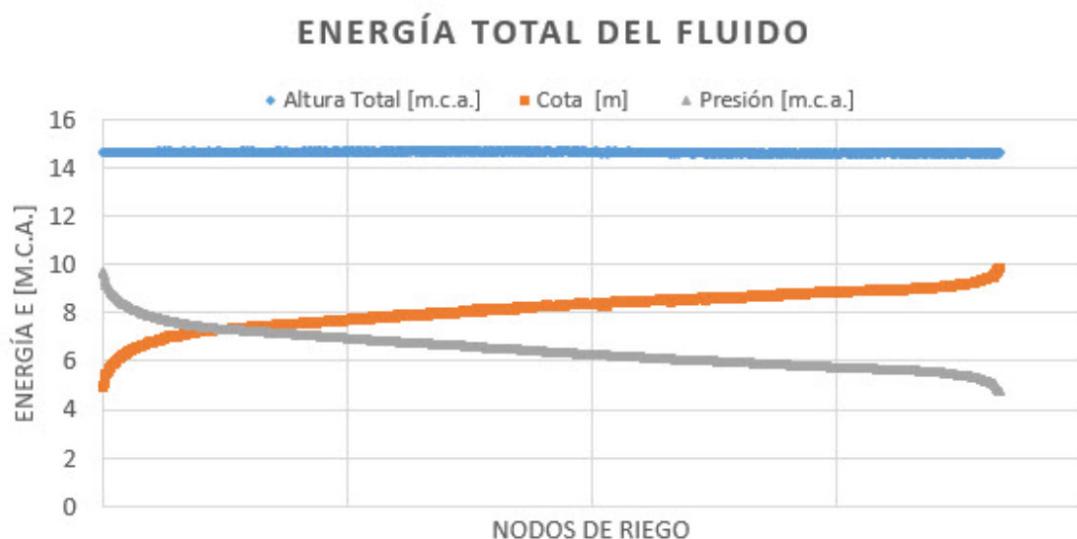
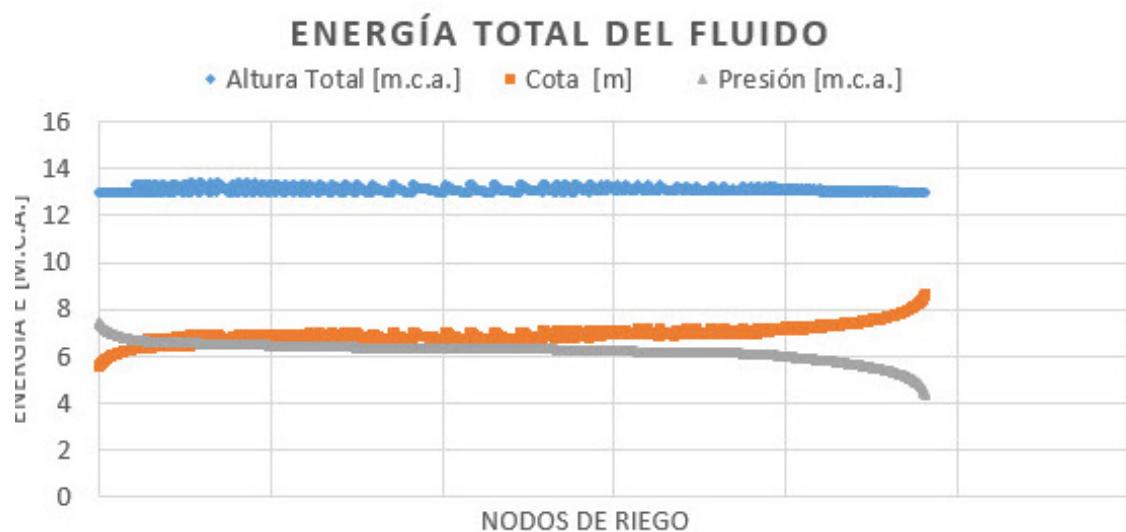


Figura 19. Resultados Campo A (3C).

Campo B	ID Nudo	Cota [m]	Demanda [Lpm]	Altura [m.c.a.]	Presión [m.c.a.]
Presión Máxima	Conexión 1927	5.52	0.06	12.95	7.43
Presión Mínima	Conexión 4264	8.66	0.06	13.01	4.35
Cota Máxima	Conexión 4264	8.66	0.06	13.01	4.35
Cota Mínima	Conexión 1927	5.52	0.06	12.95	7.43
Altura total Máxima	Conexión 3109	6.90	0.06	13.43	6.53
Altura total Mínima	Conexión 1927	5.52	0.06	12.95	7.43

Tabla 6. Resultados Campo B (3C).



Como se aprecia en las tablas 5, 6 y 7, el Campo C es el que peores condiciones tiene ya que es el que mayores cotas presenta. Sin embargo, es en el Campo B en el que encontramos el punto más desfavorable de la instalación con una presión de 4,35 m.c.a.

Se ha decidido presentar las gráficas de energía total del fluido ya que de un solo vistazo aportan una gran cantidad de información sobre la instalación. Se puede apreciar como la cota es el principal causante de la caída de presión en el sistema y que la suma de energía potencial (cota) y energía de presión se mantiene prácticamente constante en todo momento, lo que nos hace suponer que tenemos pérdidas lineales muy bajas.

En todos los puntos de la instalación el caudal se mantiene sobre los 3.6 litros por segundo por gotero, por lo tanto, podemos asumir que es una opción válida.

Los resultados obtenidos de EPANET pueden consultarse en los anexos **ANEXO IV**, **ANEXO V** y **ANEXO VI** de esta memoria.

4.2 Ampliación en 4 campos.

La opción en 4 Campos se define en los planos 5.1 y 5.2. En este caso las superficies en las que se distribuyen los campos son menores, por lo tanto, esperamos obtener mayores márgenes de presión en los resultados.

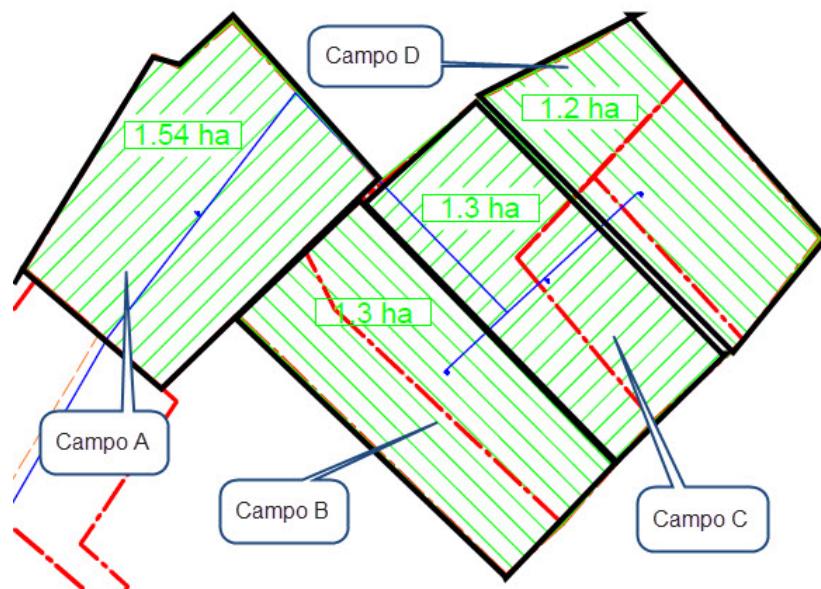


Figura 22. Solución en 4 Campos.

Campo A	ID Nudo	Cota [m]	Demanda [Lpm]	Altura [m.c.a.]	Presión [m.c.a.]
Presión Máxima	Conexión 56	4.91	0.06	14.62	9.71
Presión Mínima	Conexión 1858	9.87	0.06	14.62	4.75
Cota Máxima	Conexión 1858	9.87	0.06	14.62	4.75
Cota Mínima	Conexión 56	4.91	0.06	14.62	9.71
Altura total Máxima	Conexión 936	8.23	0.06	14.74	6.51
Altura total Mínima	Conexión 1455	8.29	0.06	14.56	6.28

Tabla 8. Resultados Campo A (4C).

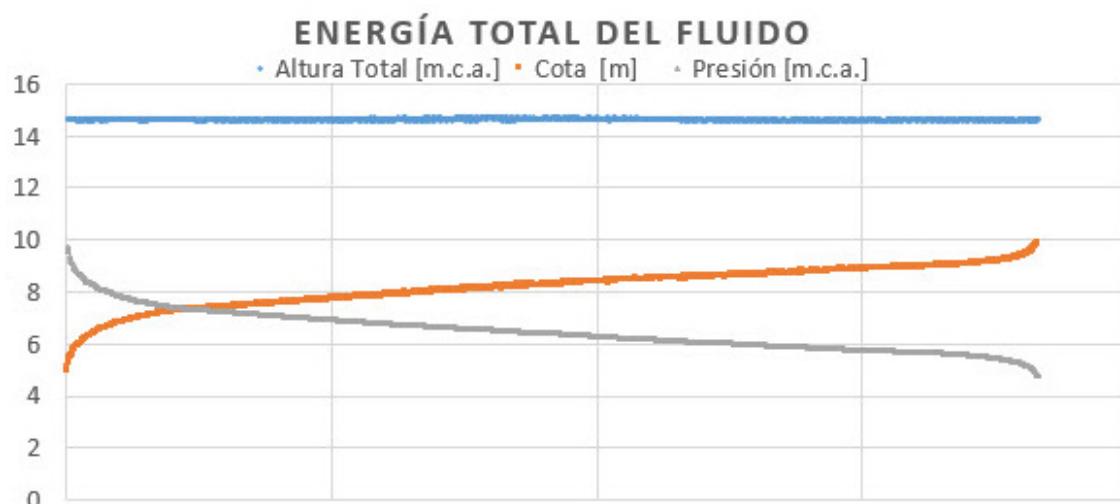


Figura 23. Resultados Campo A (4C).

Campo B	ID Nudo	Cota [m]	Demanda [Lpm]	Altura [m.c.a.]	Presión [m.c.a.]
Presión Máxima	Conexión 1927	5.94	0.06	14.62	8.68
Presión Mínima	Conexión 3334	9.88	0.06	14.65	4.77
Cota Máxima	Conexión 3334	9.88	0.06	14.65	4.77
Cota Mínima	Conexión 1927	5.94	0.06	14.62	8.68
Altura total Máxima	Conexión 3392	7.32	0.06	15.04	7.72
Altura total Mínima	Conexión 1927	5.94	0.06	14.62	8.68

Tabla 9. Resultados Campo B (4C).

ENERGÍA TOTAL DEL FLUIDO

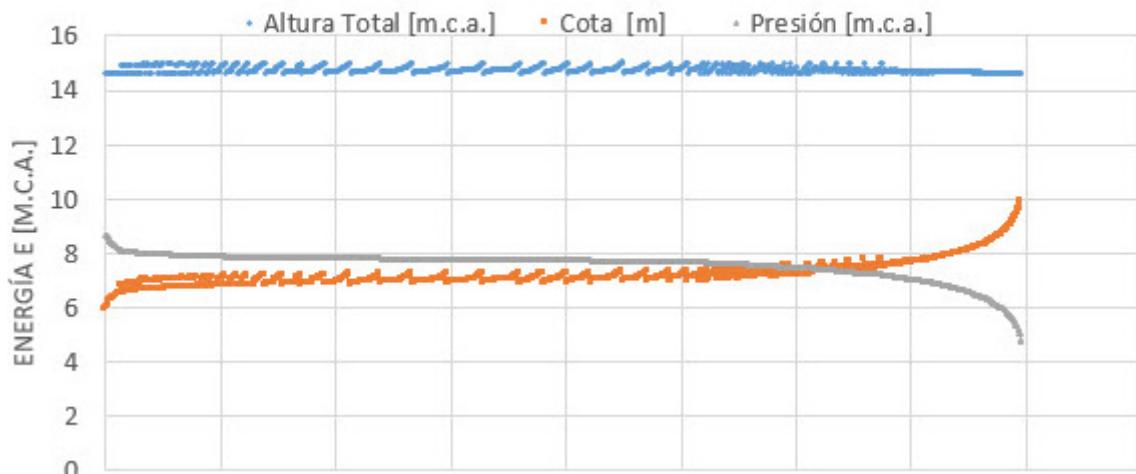


Figura 24. Resultados Campo B (4C).

Campo C	ID Nudo	Cota [m]	Demanda [Lpm]	Altura [m.c.a.]	Presión [m.c.a.]
Presión Máxima	Conexión 3691	7.14	0.06	14.75	7.61
Presión Mínima	Conexión 3536	9.61	0.06	14.64	5.04
Cota Máxima	Conexión 3536	9.61	0.06	14.64	5.04
Cota Mínima	Conexión 3691	7.14	0.06	14.75	7.61
Altura total Máxima	Conexión 4269	8.47	0.06	15.05	6.57
Altura total Mínima	Conexión 3751	9.37	0.06	14.64	5.28

Tabla 10. Resultados Campo C (4C).

ENERGÍA TOTAL DEL FLUIDO

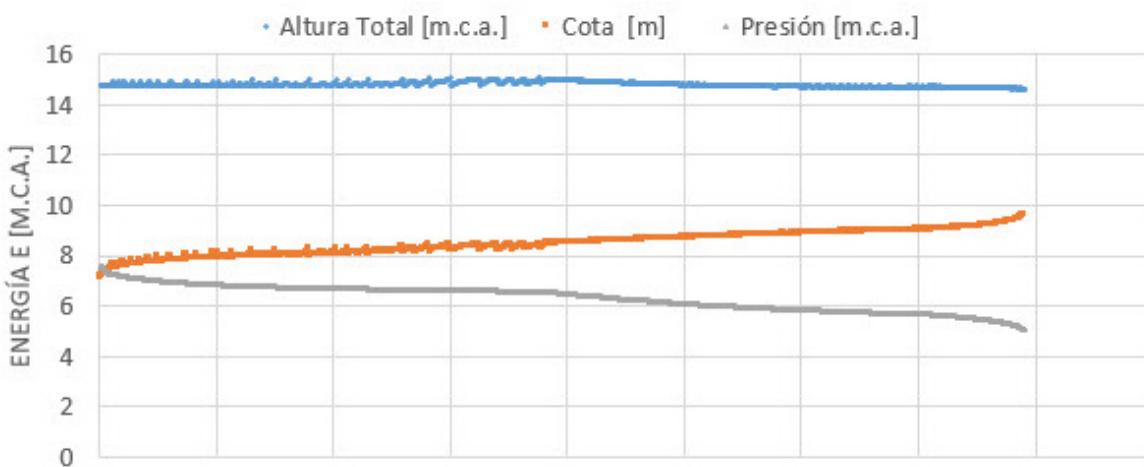


Figura 25. Resultados Campo C (4C).

Campo D	ID Nudo	Cota [m]	Demanda [Lpm]	Altura [m.c.a.]	Presión [m.c.a.]
Presión Máxima	Conexión 6412	8.15	0.06	15.29	7.15
Presión Mínima	Conexión 5129	8.70	0.06	14.99	6.29
Cota Máxima	Conexión 5129	8.70	0.06	14.99	6.29
Cota Mínima	Conexión 6501	8.02	0.06	15.13	7.12
Altura total Máxima	Conexión 5727	8.18	0.06	15.32	7.14
Altura total Mínima	Conexión 5186	8.02	0.06	14.99	6.97

Tabla 11. Resultados Campo D (4C).

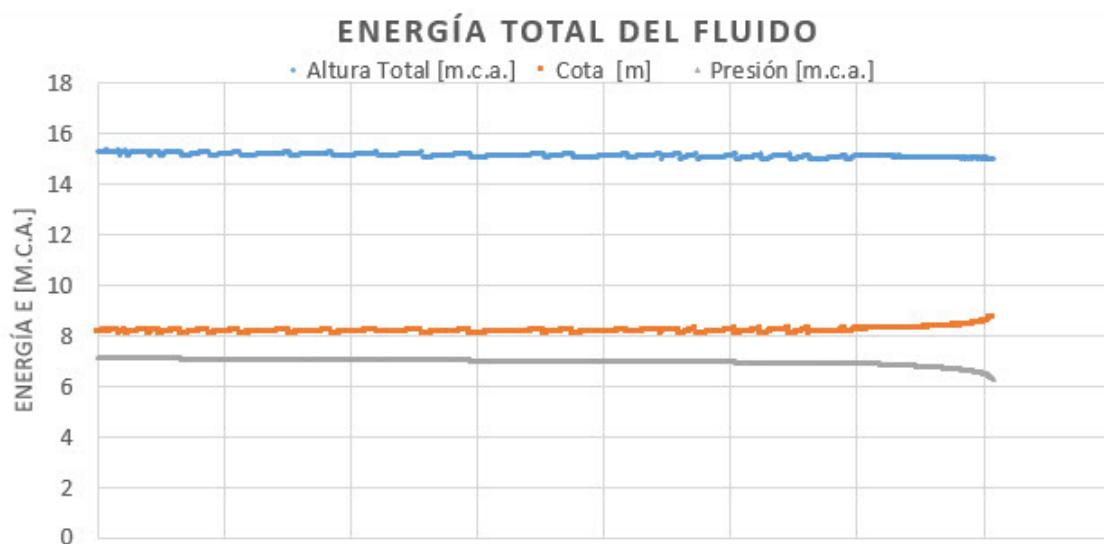


Figura 26. Resultados Campo D (4C).

Como se esperaba, encontramos resultados con mejores presiones que en el caso de la sectorización en 3 campos. Mucho más pronunciadas estas mejorías en el Campo D (4C) si lo comparamos con los resultados del Campo C (3C). Aunque son poco apreciables, se intuye que las pérdidas lineales en el caso de la sectorización con 3 campos van a ser menores. Esto es debido a que hay menor distancia entre el punto de abastecimiento y los goteros más exteriores de cada red.

Los resultados obtenidos de EPANET pueden consultarse en los anexos **ANEXO VII**, **ANEXO VIII**, **ANEXO IX** y **ANEXO X** de esta memoria.

4.3 Conclusiones finales.

En ambos dos casos, sectorización en 3 campos y sectorización en 4 campos, los caudales resultantes cumplen con los establecido según las indicaciones del solicitante del presente proyecto.

Las ventajas del sectorizado en 4 campos son destacables frente a la otra opción propuesta, no obstante, conllevará un mayor coste de instalación de red de abastecimiento. Habría valorar si es del todo necesario la presencia de una presión remanente en la tubería mayor de la que presenta la solución en 3 sectores de riego.

5. BIBLIOGRAFIA

SigPac {Ref [1]}

Sistema de información geográfica de parcelas agrícolas. Consultado en:
{<http://sigpac.aragon.es/visor/>}, Julio 2015-septiembre 2016.

EPANET {Ref [2]}

Programa para el cálculo de redes hidráulicas. Obtenido en:
{<http://www.instagua.upv.es/Epanet/>}, febrero 2016-septiembre 2016.

MINGW {Ref [3]}

Programa para compilar código en C. Obtenido en:
{<http://www.mingw.org/>}, febrero 2016-septiembre 2016.

Bomba 6V23 {Ref [4]}

Curvas de funcionamiento de la Bomba 6V23. Obtenido del fabricante:
{<http://www.rovatti.it/pdf/6V23.pdf>}, febrero 2016.

RainBird PC-10 {Ref [5]}

Datos técnicos de los goteros. Obtenido del fabricante Rain Bird:
{http://www.rainbird.com/documents/ag/ts_emitters.pdf}, febrero 2016.

Manual EPANET {Ref [6]}

Datos técnicos de las tuberías. Manual de EPANET:
{<http://www.instagua.upv.es/Epanet/descargas/ManualEPANETv2E.pdf>}, febrero 2016.

Otras consultas:

Código Point In Polygon {Ref [7]}

Código en base C para comprobar si un punto pertenece a un polígono. Consultado en: {<http://erich.realtimerendering.com/ptinpoly/>} febrero 2016-septiembre 2016.

Riego por goteo {Ref [8]}

Consultas generales sobre el sistema de riego por goteo. Consultado en:
{<http://ingemecanica.com/tutorialesemanal/tutorialn207.html#seccion22>} Julio 2015.

Riego por goteo {Ref [9]}

Consulta pérdidas asociadas a la presencia de goteros en una tubería. Consultado en:
{http://www.magrama.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/centro-nacional-tecnologia-regadios/metodos-para-el-calculo-de-perdidas-de-carga-en-tuberias-semisoras-debido-a-la-insercion-de-goteros_tcm7-398021.pdf} Julio 2015.