

# ANÁLISIS DE LA FIABILIDAD DE UNA RED DE RIEGO EN FUNCIÓN DE LA SIMULTANEIDAD DE LA DEMANDA

Reca Cardena, J.<sup>1</sup>, J. Martínez López<sup>1</sup>, J. Roldán Cañas<sup>2</sup> y J.L. Callejón Baena<sup>1</sup>

## Resumen:

Garantizar el suministro es un aspecto de vital importancia en las redes de distribución de agua para cultivos intensivos de invernadero, característicos del sudeste español. Esto es debido a su alto valor económico y a que se desarrollan sobre suelos o substratos con escasa capacidad de retención de agua que exigen riegos frecuentes. En estas condiciones, una interrupción del suministro durante un corto período de tiempo puede suponer un grave perjuicio económico para el agricultor. A pesar de que los tiempos de riego son relativamente cortos y existe un gran número de pequeños usuarios, la demanda de agua no se distribuye de manera uniforme, ya que es frecuente que las operaciones de riego se concentren en pocas horas. Esta simultaneidad del riego aumenta los requerimientos a los que esta sometida la red de distribución.

En este trabajo se presenta una metodología útil para analizar la fiabilidad de una red de distribución de agua para riego a presión. Se ha elaborado una herramienta informática que permite estudiar la respuesta de una red determinada para diferentes probabilidades de simultaneidad de la demanda. Este programa realiza la simulación hidráulica del funcionamiento de la red en cada caso y calcula diferentes índices que permiten evaluar la calidad del servicio a los usuarios. Como aplicación del modelo se estudia un caso práctico.

**Palabras clave:** redes de distribución de agua, fiabilidad de suministro de agua, gestión de redes de riego.

## ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

En el litoral almeriense se está procediendo a la sustitución progresiva de las tradicionales redes de distribución de agua abiertas por las modernas redes de tuberías a presión y con distribución de agua a la demanda. Los motivos de este cambio son varios: contribuir al ahorro de agua, disminuir las pérdidas y mejorar la calidad de servicio al regante, ya que éste dispone de agua con la presión requerida en todo momento y es libre para establecer el calendario de riego que mejor se adapte a las necesidades de su cultivo.

En los sistemas de cultivo intensivo, que allí se desarrollan, debido al elevado valor económico de las producciones y al uso cada vez más frecuente de substratos con escasa capacidad de retención de agua, cada vez es más importante asegurar el abastecimiento de agua a los regantes para evitar el grave perjuicio económico que supondría una corta

interrupción del suministro. En estudios previos realizados en redes de riego de la zona, actualmente en funcionamiento, se ha comprobado que en los momentos de mayor demanda hídrica es habitual que algunos agricultores no puedan regar debido a que no disponen de presión suficiente en sus tomas. En algunos casos, cuando estos problemas son más frecuentes, el agricultor se ve obligado a construir y utilizar su propia balsa de regulación.

Una de las causas de esta situación es que el diseño de dichas redes no tiene en cuenta el comportamiento real de los usuarios. Diversos trabajos previos se han orientado a tratar de caracterizar dichos sistemas de distribución de agua para poder establecer criterios de diseño más racionales en las nuevas redes de riego. Martínez y col (2000a) realizaron una encuesta en campo para caracterizar las pautas de programación y gestión de riego de los agricultores en cultivos de invernadero. Con los datos obtenidos, Reca y col (2000) desarrollaron un

1. Departamento de Ingeniería Rural. Universidad de Almería, España.

2. Departamento de Agronomía. Universidad de Córdoba, España.

Artículo recibido el 11 de octubre de 2000, recibido en forma revisada el 4 de octubre de 2001 y aceptado para su publicación el 29 de noviembre de 2001. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

modelo de estimación de los consumos en redes de distribución de agua a presión, ramificadas y a la demanda. En estos trabajos, se observó la tendencia de los usuarios a concentrar las operaciones de riego durante un corto periodo de tiempo, en lugar de distribuirse uniformemente a lo largo del día. Esto supone una demanda real de la red mayor de la que se previó en la fase de proyecto.

Parece interesante evaluar el comportamiento de las redes a presión en función del grado de simultaneidad de las operaciones de riego. Esto permitirá conocer mejor la capacidad real de la red, establecer las medidas oportunas y garantizar al agricultor un adecuado servicio. Para ello es necesario disponer de herramientas que permitan realizar el análisis de la respuesta de la red bajo diferentes condiciones de servicio. Estas herramientas deben estar basadas en modelos de simulación hidráulica de redes de tuberías. Entre estos últimos, destaca el modelo EPANET (Rossman, 1997), desarrollado por la Agencia de Protección Medioambiental de los Estados Unidos (EPA) para el estudio del comportamiento hidráulico y de la calidad de agua en redes de abastecimiento de agua tanto malladas como ramificadas. La Unidad de Mecánica de Fluidos de la Universidad Politécnica de Valencia, tomando como base el anterior, desarrolló el modelo SARA en el que se mejora la interfaz gráfica para la introducción de los datos de la red. Otro modelo, desarrollado en la Universidad de Zaragoza, es el GESTAR, que realiza la simulación hidráulica de redes presurizadas en régimen estacionario y que está específicamente concebido para el análisis de redes de distribución de agua para riego (Aliod, 1997).

Tradicionalmente, a la mejora de la gestión y al análisis de la fiabilidad de las redes de riego se le ha prestado relativamente poca atención, al contrario de lo que ocurre en el caso de abastecimientos urbanos (Cabrera y Vela, 1995). Esto es debido a que se consideraba que en el caso de redes de riego, la interrupción temporal del suministro de agua no tenía una repercusión socioeconómica tan grave como en las redes urbanas. Actualmente, por los motivos expuestos, esta concepción está cambiando y recientemente se están llevando a cabo cada vez más estudios enfocados a evaluar la fiabilidad de las redes de riego y mejorar la calidad de servicio a los usuarios. El mencionado modelo GESTAR dispone de una opción que permite simular escenarios de demanda generados de forma aleatoria. No obstante, cuantificar la fiabilidad de la red exige estudiar de forma automática un elevado nú-

mero de posibles configuraciones de demanda y caracterizar los resultados de forma estadística. Para ello, es necesario definir índices de gestión que cuantifiquen la calidad de servicio de la red. Lamaddalena y Sagardoy (2000) proponen algunos y desarrollan un modelo para la mejora de la gestión de redes de riego, que los calcula a partir de múltiples simulaciones hidráulicas. No obstante, éste está limitado al caso particular de redes ramificadas.

Por tanto, los objetivos de este trabajo serán: definir diversos índices de gestión que permitan evaluar la fiabilidad de una red de riego a la demanda, tanto mallada como ramificada, desarrollar una herramienta informática que realice el análisis hidráulico de dicha red bajo diferentes niveles de simultaneidad de la demanda y que calcule, en cada caso, los mencionados índices. Además se pretende aplicar esta herramienta para evaluar la calidad de servicio en una red de riego, actualmente en funcionamiento, que abastece una zona de cultivos intensivos en el litoral almeriense.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Desarrollo del programa informático.

El núcleo fundamental del programa desarrollado es el modelo de simulación hidráulica de la red. Para ello, se han utilizado las herramientas de desarrollo del modelo EPANET (Rossman, 1997). Estas herramientas de desarrollo están constituidas por una librería externa de enlace dinámico (DLL) que incluye un conjunto de subrutinas y funciones de cálculo que permiten personalizar dicho modelo y ampliar su potencia. Una de las mayores ventajas que esto aporta, es que es posible incorporar nuevas herramientas y utilidades programadas para resolver problemas específicos sobre la base de un núcleo de cálculo como el de EPANET, uno de los programas de análisis de redes más utilizados, y cuya fiabilidad ha sido ampliamente contrastada. Otra de las ventajas que ha inclinado al uso de estas herramientas es la posibilidad de disponer de ellas de forma gratuita.

Las funciones incluidas en la biblioteca de enlace dinámico (DLLs) pueden ser incorporadas a programas realizados sobre entorno Windows independientemente del lenguaje de programación que se utilice (C/C++, Delphi, Visual Basic, etc.). En concreto, el modelo se ha programado en lenguaje Visual Basic.

El modelo permite leer la información de una red de riego previamente digitalizada a partir de un fichero de datos en formato EPANET. Además, el programa gestiona una base de datos en formato Excel mediante la tecnología de automatización OLE (Object Linking and Embedding) de la que obtiene la información necesaria para describir las características de las bocas de riego. Una boca de riego está constituida por un número variable de tomas secundarias, cada una de las cuales abastece a uno o varios regantes. El número de tomas de cada boca de riego, la superficie dominada y el número de usuarios a los que suministra agua, son datos necesarios para el programa.

El primer paso consiste en variar, de forma iterativa, la proporción de usuarios que en un determinado momento se encuentran regando desde un porcentaje pequeño (5%) hasta que todas las tomas se encuentran en funcionamiento, usando incrementos fijos (5%). Para cada una de estas situaciones, se simulan un elevado número de escenarios de demanda aleatorios, en concreto en la aplicación realizada se han simulado 100 configuraciones aleatorias diferentes para cada nivel de simultaneidad. Dichas configuraciones se generan automáticamente mediante un sorteo realizado con un generador de números aleatorios que modifica la distribución de tomas abiertas y cerradas. Un aspecto que se debe considerar para que el análisis responda a la realidad, es que las bocas de riego pueden abastecer un número variable de tomas que dan servicio a diferentes usuarios con diferente superficie de riego. Esto implica que la probabilidad de apertura de cada boca de riego es diferente, lo que conviene considerar al definir la distribución aleatoria de tomas abiertas. Para tener en cuenta este aspecto, el sorteo aleatorio se realiza entre sectores de riego, que suelen ser homogéneos (de aproximadamente 3.000 m<sup>2</sup>) en este tipo de sistemas debido a que en las tomas hay limitadores de caudal, y no entre bocas de riego, que abastecen a superficies de riego heterogéneas.

Para cada configuración de consumos, se realiza una simulación hidráulica estática de la red, fruto de la cual se conocen los valores de las variables hidráulicas dependientes: caudal que circula por cada conducción y presión en cada boca de riego. A partir de estos datos se calculan los índices de garantía de servicio que servirán para evaluar el comportamiento de la red.

En este trabajo, se proponen diversos índices que permiten cuantificar la garantía de servicio en

función del número de fallos observados en la red. Se considera que se produce un fallo, cuando la presión en una toma cae por debajo del valor mínimo requerido para el correcto funcionamiento de los sistemas de riego (20 mca). Los índices que se van a calcular son los siguientes:

- Probabilidad de fallo de la red: es el número de veces que se produce un fallo en relación al número de iteraciones realizadas. Se entiende por fallo de la red cuando al menos una boca se ha quedado con presión inferior a la requerida.
- Promedio de fallos en la red: es el porcentaje medio de bocas que han fallado. Este índice da idea de la importancia de los fallos.
- Desviación típica de fallos en la red: es el valor de la desviación típica del porcentaje de tomas que fallan.
- Probabilidad de fallo por toma: es el número de veces que se produce un fallo en una toma concreta en relación al número de iteraciones realizado.
- Presión media por toma: es el valor medio de la presión en cada toma.
- Desviación típica de la presión por toma.

Aún cuando el uso de estos índices es cómodo, sería recomendable elaborar criterios de valoración más complejos que tengan en cuenta el impacto económico que representa cada posible fallo o interrupción del servicio en función de su duración, reiteración, número de usuarios afectados y tipo de sistema de cultivo (suelo o substrato).

Una vez calculados estos índices, el programa guarda los resultados mediante la tecnología OLE en una hoja de cálculo Excel, lo que permite realizar posteriores análisis estadísticos de los mismos, así como generar informes y salidas gráficas.

### **Aplicación a una red de riego en funcionamiento.**

La metodología descrita se ha aplicado al análisis de una red de riego actualmente en funcionamiento (ver figura 1). Se trata de la red de distribución de agua mediante tuberías a presión que abastece a la Comunidad de regantes "Sol-Poniente" (Caja Rural de Almería, 1997). Ésta es una red de tipología mixta que abastece a un total de 1466 socios y a una superficie de invernaderos de 1520 ha,

en las costa de Almería. La red está alimentada por un total de 5 depósitos de regulación que se alimentan del embalse de Beninar. De igual forma, dispone de pozos cedidos por el IARA y de pozos particulares. Existen un total de 5 sondeos que inyectan el agua directamente a la red realizándose la conexión en diferentes puntos de la misma. En momentos de escasa demanda en la red no se suelen utilizar los pozos y la red se alimenta exclusivamente de los depósitos de regulación. No obstante, en momentos en que la demanda aumenta se van utilizando los diferentes sondeos de acuerdo a los criterios preestablecidos por los gestores de la comunidad. Debido a los continuos problemas que se observan en la misma, interesa conocer su respuesta en las condiciones más favorables, es decir, con los depósitos llenos y los sondeos en funcionamiento. No obstante, se puede analizar la red bajo otras condiciones de funcionamiento al objeto de elaborar criterios óptimos de gestión de la misma.

La red de riego tiene una totalidad de 412 bocas, cada boca presenta una o varias tomas. La mayor parte de los bocas abastecen a una o dos tomas, siendo muy reducida la proporción de las que tienen 3 o más. El número total de tomas en la red es 718. Cada una de éstas, a su vez, abastece a un número variable de regantes, siendo la superficie media dominada por cada una de aproximadamente 2 ha. Todas las tomas presentan un limitador de caudal de 20.000 l/h. Por ello, en el caso de que varios

usuarios compartan una misma toma no podrán regar simultáneamente. No obstante, en un momento determinado sí podrán estar en funcionamiento varias tomas por boca de riego.

La primera fase del trabajo ha consistido en obtener la información relativa a la red de riego. Debido a los continuos cambios que dicha red ha ido experimentando para resolver los problemas que se han planteado a sus gestores, ha sido necesario llevar a cabo un minucioso trabajo de campo y de gabinete para actualizar la información disponible de la red y que esta responda fielmente a la realidad. La información geográfica se ha digitalizado utilizando el programa Autocad y la información no espacial asociada a la red se ha procesado mediante una base de datos relacional. A partir de esta información, se han elaborado los ficheros de entrada necesarios para el modelo: el fichero de datos de la red en formato EPANET y la base de datos de las características de las bocas de riego. Esta información es la que va a servir de base para modelar su comportamiento hidráulico. No obstante, se está llevando a cabo la monitorización de la red para obtener los datos necesarios para validar los resultados obtenidos (Martinez y col. 2000b).

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como resultados de la aplicación del modelo a la red de riego se dispone de una hoja de cálculo en formato Excel, que proporciona para cada grado de simultaneidad los valores de los índices de garantía anteriormente descritos. Con esta información el gestor de la red de riego conoce de forma detallada el comportamiento de la red para cada caso y puede actuar en consecuencia.

En este apartado se resumen los resultados más significativos obtenidos de la aplicación del modelo. En la figura 2 se representa la probabilidad de fallo de la red estudiada en función del grado de simultaneidad. Se observa que a partir de un 15% de simultaneidad empiezan a producirse fallos en la red. Cuando el 20% de las tomas están en funcionamiento, cabe esperar una probabilidad de fallo del 7%. La probabilidad de fallo de la red se incrementa de forma espectacular a partir de ese punto y para una simultaneidad del 40%, la probabilidad de fallo es 1.

No obstante, debido a la propia definición que se hace de fallo de la red, este primer criterio no nos informa sobre la repercusión que tienen dichos fa-

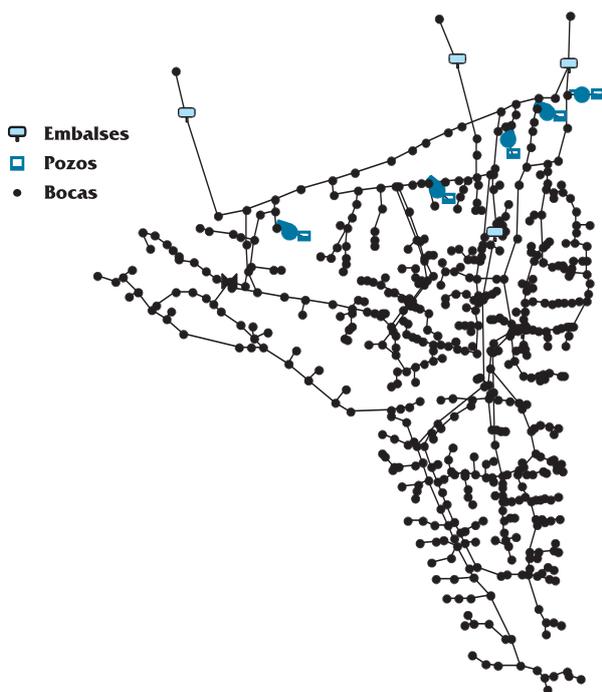


Figura 1. Red de riego en estudio

# ANÁLISIS DE LA FIABILIDAD DE UNA RED DE RIEGO EN FUNCIÓN DE LA SIMULTANEIDAD DE LA DEMANDA

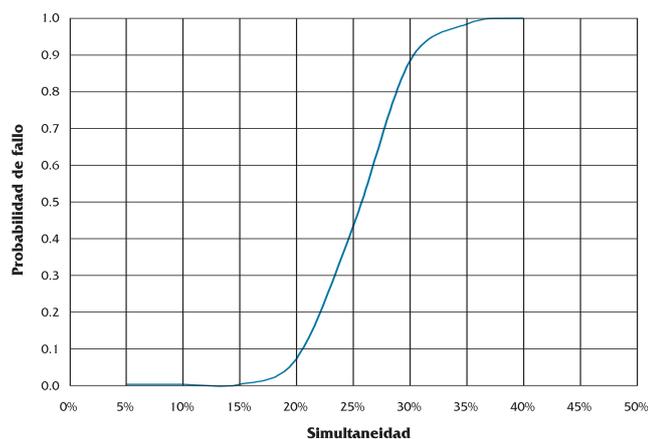


Figura 2. Evolución de la probabilidad de fallo con el grado de simultaneidad.

llos. El segundo índice, en cambio, proporciona mayor información en este aspecto. Se trata de la fracción o porcentaje de tomas afectadas por un descenso de presión. La figura 3 muestra la evolución de este índice. En la gráfica se representa el valor medio y  $\pm 0,5$  veces la desviación típica. Se observa que aunque la probabilidad de fallo para una simultaneidad del 20% era relativamente alta (7%), sin embargo el nº de bocas afectadas por estos fallos es muy bajo. Solamente se produce el fallo en una media inferior al 0,2% de las bocas de la red. Es decir, se trata de un problema muy puntual que afecta a pocas bocas desfavorables por lo que esta situación no reviste especial gravedad. En concreto para este caso, se han producido fallos en solamente 8 bocas de la red y con una probabilidad de fallo relativamente baja. Así la boca H-395, la más desfavorable ha tenido una probabilidad de fallo del 4%, otras 4 bocas (H-394, H-396, H-418 y H-417) presentan una probabilidad de fallo del 2% y las tres restantes (H-305, H-306 y H-307) una probabilidad de fallo del 1%.

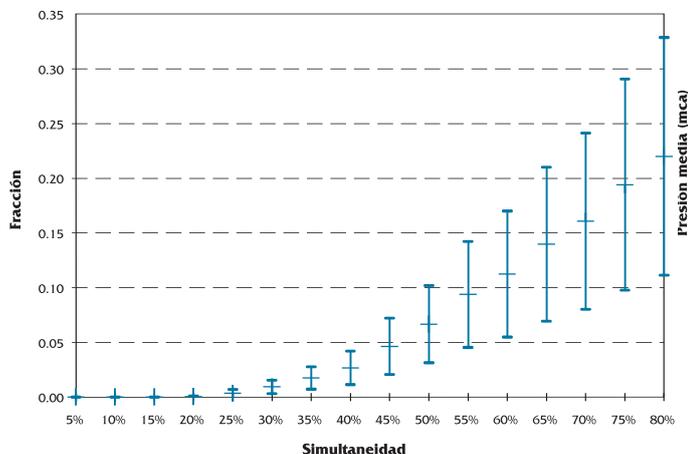


Figura 3. Promedio de fallos en la red.

Otra forma de evaluar la repercusión de los fallos producidos en la red es determinar la importancia del descenso de presión experimentado en la boca de riego. Déficits de presión relativamente pequeños, aún cuando son considerados como fallos según los criterios anteriores, pueden afectar relativamente poco a los sistemas de riego a los que abastecen y por tanto no producen un serio inconveniente. Grandes descensos de presión, por el contrario, impiden el funcionamiento correcto de los sistemas de riego. Siguiendo con el caso anterior, la toma H-395, la más desfavorable, para el mismo grado de simultaneidad tuvo una presión media de casi 40 mca, muy superior a la requerida, por lo que los fallos observados probablemente se debieron a que la presión descendió ligeramente de los 20 mca necesarios.

En la figura 4 se ilustra la evolución de la presión media y del porcentaje de fallos para dos bocas representativas de diferentes situaciones. Se observa que en una de ellas, aunque parte de una presión no excesivamente alta, dicha variable se mantiene relativamente constante, a pesar de incrementarse la demanda de la red. En cambio, la otra que dispone de una presión muy alta en condiciones de baja demanda, sufre un descenso brusco de la misma a poco que aumentan los consumos. Esto es debido a las relaciones entre la posición topológica de la boca de riego y la cota a la que se encuentra. Realizando este análisis sobre los resultados obtenidos para las restantes bocas que componen la red de riego, es posible determinar para qué condiciones de demanda pueden producirse problemas concretos en cada boca y adoptar las medidas oportunas.

En trabajos previos realizados por los autores se ha caracterizado temporalmente las pautas de

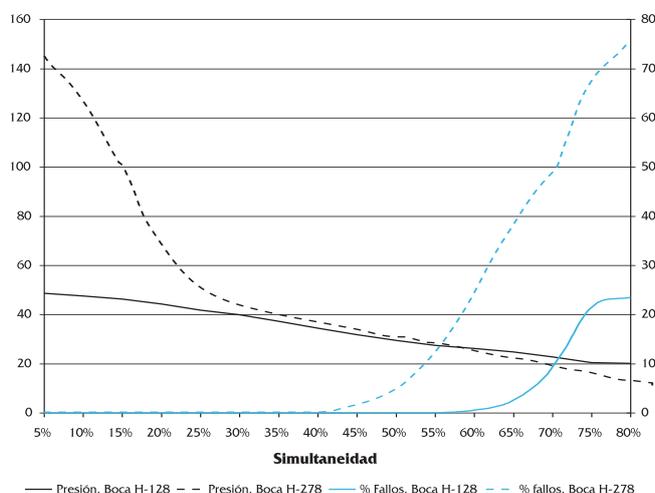


Figura 4. Evolución de la presión media y del porcentaje de fallos en dos bocas de riego.

demanda de los agricultores en función de los tipos de cultivo y época del año, por lo que se puede estimar el grado de simultaneidad de riego en este tipo de sistemas de cultivo en cualquier momento (Reca y col., 2000). Con la ayuda de la herramienta desarrollada se podrá prever, por tanto, la respuesta temporal del sistema, estudiar diversas alternativas de gestión y adoptar las medidas correctoras adecuadas para mejorar el servicio al usuario.

#### 4. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado una metodología útil para analizar la capacidad de una red de distribución de agua para riego a presión. Se ha elaborado una herramienta informática que permite estudiar la respuesta de una red a diferentes niveles de simultaneidad en la demanda. Éste programa realiza la simulación hidráulica del funcionamiento de la red en cada caso y calcula varios índices que permiten evaluar la calidad de servicio a los usuarios.

En la red analizada, se observa que la probabilidad máxima de fallo se alcanza con un valor de simultaneidad relativamente bajo, lo que pone de manifiesto que dicha red actualmente se halla infradimensionada debido fundamentalmente a dos factores: el desconocimiento de las demandas reales del sistema cuando se proyectó y el incremento de la superficie de riego, que ha superado las previsiones iniciales.

En todas las redes de distribución de agua en general, y en la estudiada en particular, se observa la existencia de bocas de riego, que debido a su posición, son especialmente sensibles a las fluctuaciones de la demanda ya que se aprecian grandes variaciones de la presión en las mismas. Un objetivo del diseño hidráulico de las redes debe ser minimizar el número de este tipo de bocas.

Aunque en este trabajo la fiabilidad de la red se analiza con criterios que tienen en cuenta el número de fallos que se producen, sería conveniente establecer otros índices que midan la repercusión económica de dichos fallos, teniendo en cuenta aspectos de gran importancia como son: duración y frecuencia de los fallos, magnitud del descenso de la presión, número de usuarios afectados y tipo de sistema de riego y de cultivo.

#### AGRADECIMIENTO

Los autores desean agradecer a la FIAPA (Fundación para la Investigación Agraria en la Provincia de Almería) y a la CICYT (Comisión Interministerial para la Ciencia Y la Tecnología) el apoyo financiero que han prestado para la realización de este trabajo, en el marco de los proyectos 97/D/149 y AGL2000-1223 respectivamente

#### 5. BIBLIOGRAFÍA

- ALIOD, R., EIZAGUERRI, A., ESTRADA; PERNA, E. 1997. Métodos Convencionales y Avanzados para el Diseño y Análisis Hidráulico de Redes de Distribución a Presión en Riego a la Demanda. Riegos y Drenajes Siglo XXI, nº 22, Enero 1997
- CABRERA, E. y A. VELA (Eds.). 1995. Mejora del Rendimiento y de la Fiabilidad en Sistemas de Distribución de Agua. Grupo Mecánica de Fluidos (U.P.V.). Valencia.
- CAJA RURAL DE ALMERÍA. 1997. Gestión del regadío en el Campo de Dalías: Las comunidades de regantes Sol y Arena y Sol-Poniente. Caja Rural de Almería.
- LAMADDALENA, N. y J. A. SAGARDOY. 2000. Performance analysis of on-demand pressurized irrigation systems. FAO Irrigation and Drainage Paper 59. Roma.
- MARTÍNEZ, J; J. RECA; A. ZAPATA; C. ARRIOLA y J.L. CALLEJÓN. 2000a. Manejo del riego en invernadero. Caracterización experimental en Almería. Riegos y Drenajes XXI, nº 113: 50-55
- MARTÍNEZ, J; J. RECA; R. LÓPEZ y J.L. CALLEJÓN. 2000b. Desarrollo de equipo automatizado para la toma de datos en redes de riego a presión. Ingeniería Civil, nº 120: 129-134
- RECA, J.; J. MARTÍNEZ; A. ZAPATA; J.G. LÓPEZ y J.L. CALLEJÓN. 2000. Demanda de caudal en redes de cultivos intensivos. Riegos y Drenajes XXI, nº 110: 40-45
- ROSSMAN, L.A.. 1997. Manual del Usuario de EPANET Versión 1.1e. Traducción al castellano. Grupo de Mecánica de Fluidos. Universidad Politécnica de Valencia.