

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

<i>Título</i>	Flexibilidad del riego para distribución interparcelaria con tubería de baja presión.
<i>Autor / Adscripción</i>	Gustavo Magaña Sosa Benjamín de León Mojarro Carlos Fuentes Ruiz Luis Rendón Pimentel  Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
<i>Publicación</i>	Ingeniería Hidráulica en México, 13(3): 35-43
<i>Fecha de publicación</i>	1998
<i>Resumen</i>	En este trabajo se presenta un procedimiento para el diseño de una red colectiva de riego con base en tuberías de baja presión, que maximiza la eficiencia de distribución, de manejo fácil y flexible. Se desarrolló un modelo para determinar las necesidades de riego y se definió un procedimiento para obtener el gasto de la red. También se elaboró un programa de cómputo para simular el funcionamiento de la red y así analizar la flexibilidad del sistema. El procedimiento propuesto se aplicó en una superficie de 67.7 ha del Distrito de Riego 076, Valle del Carrizo, Sinaloa, alimentada por una toma granja.
<i>Identificador</i>	<a href="http://hdl.handle.net/123456789/1230">http://hdl.handle.net/123456789/1230</a>

## Flexibilidad del riego para distribución interparcelaria con tubería de baja presión

Gustavo Magaña Sosa  
Benjamín de León Mojarro  
Carlos Fuentes Ruiz  
Luis Rendón Pimentel

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

*En este trabajo se presenta un procedimiento para el diseño de una red colectiva de riego con base en tuberías de baja presión, que maximiza la eficiencia de distribución, de manejo fácil y flexible. Se desarrolló un modelo para determinar las necesidades de riego y se definió un procedimiento para obtener el gasto de la red. También se elaboró un programa de cómputo para simular el funcionamiento de la red y así analizar la flexibilidad del sistema. El procedimiento propuesto se aplicó en una superficie de 67.7 ha del Distrito de Riego 076, Valle del Carrizo, Sinaloa, alimentada por una toma granja. En el trazo de la red se analizaron cuatro opciones: dos para riego con sifones y dos para riego con tubería de compuertas; en ambos casos se consideró trazo por lindes y trazo con optimización de longitudes. El análisis de flexibilidad de la red para un padrón de cultivos con la máxima demanda de agua, y para fechas de siembra recomendadas, indicó que las cuatro opciones fueron capaces de aplicar el agua requerida sin ocasionar retrasos superiores de diez horas. En el caso hipotético de que todos los usuarios requieran riego en la misma fecha con lámina de 12 cm, el tiempo de aplicación sería aproximadamente 3.3 días.*

**Palabras clave:** Flexibilidad del riego, red de distribución, necesidad de riego, baja presión.

### Introducción

Uno de los grandes problemas del riego por gravedad es la baja eficiencia global en el uso del agua. De acuerdo con encuestas de 56 países efectuadas en 1972, se encontró que dicha eficiencia varía entre 10 y 70%; en 80% de esos países es menor que 40% (Luján, 1992). En las grandes zonas de riego, la mayor parte de las pérdidas del agua corresponden a la conducción. En México, por ejemplo, en tres de los más importantes distritos de riego del noroeste (Río Fuerte, Río Yaqui y Río Mayo) la eficiencia de conducción varía entre 55 y 67 por ciento.

En cuanto a la distribución del agua, sobre todo en grandes áreas, el problema principal consiste en entregarla oportunamente a los usuarios; no hacerlo así puede afectar significativamente el rendimiento del cultivo. En México, la forma de distribución que predomina en las zonas de riego se basa en una demanda controlada, que consiste en entregar el agua al pro-

ductor un cierto tiempo después de haber recibido su solicitud. El tiempo de entrega, generalmente una semana, puede reducirse mejorando la coordinación entre los usuarios y los operadores del sistema de riego. La escasa capacidad del sistema para abastecer de agua a los usuarios con prontitud, es decir, su baja flexibilidad, se debe fundamentalmente a que la infraestructura está conformada por canales a cielo abierto, y a los métodos y materiales utilizados en la operación de los canales.

En Francia y España se ha tenido éxito con redes de distribución de agua con base en tubería de baja presión para riego por gravedad. Este sistema maximiza la eficiencia en el uso del agua y permite flexibilidad en su manejo, ya que el agua se puede distribuir a demanda libre, cuando el usuario lo estime oportuno y durante el tiempo que lo desee; evidentemente cuantificada en forma volumétrica. En los distritos de riego de México, este tipo de sistema representa una buena opción para lograr una mayor eficiencia en el uso del

agua y un manejo flexible del riego en la red de distribución.

Para estimar las necesidades de riego, se han utilizado con buenos resultados los modelos de simulación del régimen hídrico del suelo. Según la ecuación que se utilice, los modelos pueden clasificarse en los que se basan en la ecuación de balance global de la masa (Van Bavel y Ahmed, 1976; Campbell y Díaz, 1986; Melo, 1989; Magaña, 1991; Reyes, 1991) y en los que se apoyan en la ecuación del movimiento del agua en el suelo (Neuman *et al.*, 1975; Feddes *et al.*, 1975; Lafolie *et al.*, 1991; Brukler *et al.*, 1991; Syring, 1990). Es de esperarse que el segundo grupo de modelos, si están bien calibrados, sea más preciso para simular el régimen hídrico del suelo que el primer grupo. Sin embargo, para fines de planeación, es suficiente la precisión obtenida con un modelo de balance global de la masa.

En el diseño de la red de distribución, la forma de entregar el agua a los usuarios es un factor determinante para definir la capacidad del sistema. En un sistema proyectado a demanda libre, los caudales que circulan por la red pueden definirse por una función aleatoria, ya que en ningún momento se fija el número de hidrantes ni el caudal derivado en cada uno de ellos. El gasto que circula en cada tramo de la red se calcula considerando el número de tomas abiertas a las cuales abastece dicho tramo. Si se parte del hecho de que una toma está completamente abierta o completamente cerrada, y que además la operación de esa toma es independiente del resto, entonces la ley de distribución probabilística que explica el número de tomas abiertas en un momento dado, es de tipo binomial. La probabilidad  $F_x(x)$  de que opere un número máximo de  $x$  tomas en un momento dado, está dada por:

$$F_x(x) = \sum_{i=0}^x \binom{n}{i} p^i (1-p)^{(n-i)} \quad (1)$$

donde  $n$  es el número total de tomas a las que suministra agua el tramo y  $p$  es la probabilidad de que una toma esté abierta.

El número de tomas abiertas ( $x$ ) también puede obtenerse de una función de distribución normal, mediante una aproximación normal de la binomial con el Teorema del Límite Central, de donde resulta la conocida "primera fórmula generalizada de Clement", de amplia aceptación en el mundo (Granados, 1990). Dicha ecuación está dada por:

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i p_i + z_i \left[ \sum_{i=1}^n q_i p_i (q_i - q_i p_i) \right]^{1/2} \quad (2)$$

donde  $Q$  es el caudal del tramo en cuestión ( $L^3T^{-1}$ ),  $q_i$  es el caudal de la  $i$ -ésima toma ( $L^3T^{-1}$ ),  $p_i$  es la probabilidad de que la  $i$ -ésima toma esté abierta y  $z$  es un parámetro estadístico de la función de distribución normal.

Al aplicar la ecuación 2 debe considerarse que cuando  $p = 0.5$ ,  $n$  debe ser mayor que 25 para que tengan buenas aproximaciones, en tanto que cuando  $p$  se aproxima a cero o a uno,  $n$  debe ser mayor. Como regla práctica, la aproximación es buena cuando tanto  $np$  como  $n(1-p)$  son mayores que 15 (Infante y Zárate, 1990).

En este trabajo se analiza la flexibilidad de un sistema de distribución con tubería de baja presión en el Distrito de Riego 076 Valle del Carrizo, cuya eficiencia de conducción en la mayoría de los canales de distribución es de 50%. Los canales no están revestidos, presentan los consecuentes problemas de control permanente de malezas y de poca flexibilidad en su manejo. Los objetivos son:

- 1) Presentar un procedimiento de diseño de pequeñas redes de distribución de agua con tubería de baja presión, en condiciones de demanda libre, que mejore la flexibilidad en el manejo del riego.
- 2) Aplicar el diseño a un caso práctico, con su respectivo análisis de flexibilidad.

## Materiales y métodos

La metodología presentada corresponde a una toma granja del Módulo de Riego 2, con una superficie de 67.7 ha, localizada en el Distrito de Riego 076 Valle del Carrizo, al norte de Sinaloa, México. Geográficamente se ubica entre las coordenadas 26° 05' y 26° 22' latitud norte y entre 108° 53' y 109° 00' longitud oeste.

De acuerdo con García (1973), el clima es semiseco muy cálido (BS) con temperatura media mínima de 18.8 °C en enero, media máxima de 31.5 °C en septiembre, precipitación media anual de 339 mm, y evaporación media anual de 2,194 milímetros.

La topografía es ligeramente plana, con pendiente promedio de 0.4% en el sentido del riego. A la superficie referida en este trabajo se abastece de agua un canal con capacidad aproximada 400 l/s, proveniente de la presa Josefa Ortiz de Domínguez. Toda el área se riega por gravedad, principalmente mediante surcos cerrados. Entre los principales problemas, destacan:

- Baja eficiencia global en el uso del agua.
- Mal estado de la infraestructura hidráulica.
- Elevación del manto freático, por sobrerriegos, con los consecuentes problemas de drenaje y salinización.

- Degradación física y química del suelo que propician su compactación y ensalitramiento.

#### Determinación de las necesidades de riego

La necesidad de riego de un cultivo se obtiene de un balance global del agua en el suelo, considerando información de clima, suelo y cultivo. Con fines prácticos se efectúa cada cinco días, de tal forma que cada mes se divide en seis "pentadas", y se utiliza la siguiente ecuación:

$$RHS_i = RHS_{i-1} + P_i + Lr_i \pm AAP_i - ETR_i \quad (3)$$

donde  $RHS_i$  es la reserva hídrica aprovechable almacenada en la capa superficial del suelo al final de la pentada  $i$  ( $L$ );  $RHS_{i-1}$ , reserva hídrica aprovechable almacenada en la capa superficial del suelo al final de la pentada  $i-1$  ( $L$ );  $P_i$ , precipitación durante la pentada  $i$  ( $L$ );  $Lr_i$ , lámina de riego aplicada durante la pentada  $i$  ( $L$ );  $ETR_i$ , necesidad hídrica del cultivo durante la pentada  $i$  ( $L$ );  $APP_i$ , intercambio entre el almacenamiento de la capa subsuperficial y la capa superficial que está en contacto con las raíces ( $L$ ), durante la pentada  $i$ , estimada de acuerdo con lo propuesto por el Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras, citado por Gómez (1985) en cuyo trabajo las dimensiones básicas son  $L$ ,  $T$  y  $M$  para longitud, tiempo y masa, respectivamente. Evapotranspiración real,  $ETR$ . Para fines de planeación, esta variable se estima indirectamente de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$ETR = KcKsuETP \quad (4)$$

donde:

$$ETP = KpEv \quad (5)$$

$Kc$  es el coeficiente de consumo de agua por las plantas;  $Ksu$ , coeficiente de disponibilidad de agua en el suelo;  $Kp$ , coeficiente de ajuste del tanque evaporímetro;  $Ev$ , evaporación del tanque evaporímetro ( $L$ )  $ETP$ , evapotranspiración potencial ( $L$ ), estimada con el método del tanque de evaporación (Ortiz, 1987).

Lámina de riego. Se calcula para garantizar que la humedad del suelo en la zona de raíces llegue a 100% de la humedad aprovechable; se determina mediante la siguiente ecuación:

$$Lr = \frac{(1-Hm)fvPr}{Efr} \quad (6)$$

donde  $Pr$  es la profundidad del suelo considerada para el análisis ( $L$ );  $Hm$ , la fracción mínima de humedad residual aprovechable,  $Efr$ , la eficiencia de aplicación del riego;  $fv$ , la fracción volumétrica de agua aprovechable máxima que puede almacenar el suelo ( $L^3L^{-3}$ ), la cual se estima en función de la textura (Norero, citado por Gómez, 1985).

Se considera que al inicio del ciclo se aplica un riego de germinación con una lámina de 8 cm, ya que láminas menores son difíciles de lograr con riego por gravedad. Para los siguientes riegos, con fines prácticos, se considera una lámina mínima de siete centímetros.

*Momento e intervalo de riego.* El momento de riego se define cuando el contenido de humedad del suelo disminuye hasta una lámina aprovechable igual a la mínima permisible; ésta última dada por la siguiente expresión:

$$Lmin = PrfvHm \quad (7)$$

*Intervalo crítico de riego.* Es el menor intervalo entre dos riegos consecutivos para una fecha de siembra dada. Para su determinación se consideraron todas las fechas de siembra recomendadas en el distrito de riego para los cultivos más frecuentes en el área de estudio (SARH-INIFAP, 1987).

*Información requerida.* Para aplicar la metodología anterior y calcular las necesidades e intervalos de riego, se elaboró el programa de cómputo BHS, con la siguiente información:

- De los cultivos más frecuentes en el módulo de riego, se anotaron sus principales características (cuadro 1).
- Del suelo, se consideró la profundidad disponible para el crecimiento de raíces y la fracción volumétrica de agua aprovechable ( $fv$ ). Ambos se determinaron mediante muestreos directos en campo (dos muestras en cada parcela).
- Del clima, se utilizó la información de precipitación y evaporación recabada en la estación El Carrizo, durante el periodo de enero de 1969 a abril de 1993 (24 años). Para estimar la  $ETP$ , en la determinación de coeficiente  $Kp$  se consideraron las características que rodean al tanque ( $Kp=0.6$ ).

#### Proyecto de la red de distribución de agua

La red se diseñó para un sistema de riego por gravedad a demanda libre, con base en tubería de baja presión.

*Ubicación de las tomas.* Para definir la ubicación de las tomas se empleó un plano topográfico de la zona

## 1. Características consideradas para determinar las necesidades e intervalo de riego de los cultivos

Cultivo	Duración del ciclo de cultivo (días)	Profundidad máxima de raíz (cm)	Periodo de la siembra a la floración (días)	Tensión máxima permisible de humedad del suelo (atm)
Trigo ( <i>Triticum aestivum</i> L.)	130	80	80	1.15
Soya ( <i>Glycine max</i> L.) Merr.	115	75	70	1.00
Sorgo ( <i>Sorghum bicolor</i> L. Moench)	130	75	85	0.95
Garbanzo ( <i>Cicer arietinum</i> L.)	135	80	47	1.00
Maíz ( <i>Zea mays</i> L.) <sup>t</sup>	140	80	80	1.00
Maíz <sup>π</sup>	120	80	60	1.00
Papa ( <i>Solanum tuberosum</i> L.)	115	50	60	0.80
Ajonjolí ( <i>Sesamum indicum</i> L.)	120	80	50	1.00
Tomate ( <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill.)	140	50	60	1.00
Frijol ( <i>Phaseolus vulgaris</i> L.)	105	70	40	0.80

Fuente: SARH-INIFAP (1987), Doorenbos y Pruitt (1976), Palacios (1993), Gómez (1985).

<sup>t</sup> Invierno -primavera (I -P).

<sup>π</sup> Verano-otoño (V -O)

con curvas de nivel cada 25 cm, en donde se indican las parcelas de los usuarios. Se utilizaron dos criterios para aplicar el riego: mediante sifones y las regaderas (R), con las tomas localizadas en la parte más alta de cada parcela, de tal forma que pueda regarse la superficie, y mediante tubería de compuertas (C) en el que las tomas se colocan en una parte de la parcela, no necesariamente la más alta, buscando que la red de distribución sea más corta.

**Trazo de la red.** El trazo de la red colectiva de riego se realiza de tal forma que las tomas queden unidas a la fuente de alimentación. Para los dos criterios utilizados en la ubicación de las tomas, el trazo se hizo en dos modalidades: con optimización de longitudes (LO) y por lindes (LI). De lo anterior resultan cuatro trazos: LO-R, LI -R; LO -C y LO -C.

**Gasto requerido en cada toma.** Se determinó tomando en cuenta la experiencia de los usuarios en el manejo del riego, para lo cual se hicieron encuestas y mediciones en campo, y estudios sobre ingeniería de riego a nivel parcelario para maximizar la eficiencia de aplicación del agua en la parcela, la cual es del 80%. De acuerdo con lo anterior, el gasto considerado por toma resultó de cien litros por segundo.

**Cálculo de caudales para cada tramo.** El gasto que circula en cada tramo de la red se determinó considerando el número máximo de tomas abiertas a las cuales abastece dicho tramo, utilizando para ello la función de distribución binomial. Es decir, el número de tomas que operan en un momento dado, se estimó a partir de la función de probabilidad  $F_x(x)$  dada por la ecuación 1. El procedimiento para determinar el gasto

de diseño en cada tramo de la red, se describe a continuación:

- Se define el tiempo efectivo de riego ( $T_{er}$ ) durante el intervalo crítico, en el periodo de máxima demanda. Para ello, al intervalo crítico de riego se le restan días festivos y horas en que no se riega. En el caso del predio del Carrizo, este tiempo fue de 7.8 días.
- Con el gasto definido en la toma y la lámina de riego requerida por el cultivo, se calcula el tiempo necesario de operación ( $T_n$ ), en función de la superficie que domina dicha toma.
- Se estima la probabilidad ( $p$ ) de que una toma esté abierta, mediante la relación entre el tiempo de operación y el tiempo efectivo de riego.
- Se define la garantía del suministro de la red [ $F_x(x)$ ], como el porcentaje de casos de demanda que la red puede satisfacer; es decir, la probabilidad de que los caudales circulantes por la red no superen a los de diseño. Se adopta un valor mínimo de 95%, de acuerdo con la experiencia que se tiene en los países donde se han efectuado estos trabajos.
- Para la probabilidad  $F_x(x)$  dada, se calcula el número máximo de tomas abiertas ( $x$ ) simultáneamente en cada uno de los tramos de la red, con la ecuación 1.
- Finalmente, se calcula el gasto de diseño de cada tramo como el producto del número máximo de tomas abiertas y el gasto por toma.

Dimensiones de la red. La elección del diámetro en cada tramo de la red está en función de la carga míni-

ma requerida en cada toma, de la longitud del tramo, del gasto y de las características físicas de la tubería. En este trabajo se empleó el programa de cómputo DIMRED, elaborado en España, basado en el método discontinuo de Labye (1966).

### Análisis de flexibilidad del sistema propuesto

La flexibilidad se refiere a la capacidad que el sistema tiene para satisfacer con prontitud la demanda de agua por los usuarios, así como a la capacidad de disminuir las limitaciones impuestas por un sistema de distribución de agua por turnos. Bajo este concepto, en este trabajo se elaboró un programa de cómputo (Flexi) para simular el funcionamiento de la red y hacer el análisis de flexibilidad del sistema propuesto.

Para dicha simulación en cada uno de los trazos realizados, se consideró un padrón con los cultivos que más agua requieren, y las fechas de siembra recomendadas en ese distrito de riego. Con tales datos se corrió el programa BHS para definir un calendario de riegos durante todo el ciclo del cultivo. En cada fecha de riego, se simuló el funcionamiento de la red y se definieron las tomas que deben operar, así como el gasto y volumen suministrados, y la hora en que debía iniciar y finalizar la aplicación del riego.

También se determinó el tiempo que debe estar operando la red, considerando un caso hipotético en que todos los usuarios requieren aplicar un riego con la mayor lámina de riego que resulte.

*Supuestos para la simulación del sistema.* La distribución del agua es a demanda libre; la red siempre está llena; la carga en la cabecera permanece fija; el gasto total máximo que se considera en la red, es el definido en el diseño; el agua está disponible para riego las 24 horas del día.

### Algoritmo para la simulación del sistema

*Información necesaria para la simulación.* Se requieren las características hidráulicas de la red, padrón de cultivos y calendario de riegos. Procesamiento de la información. En este caso:

- 1) Gasto requerido en una o más tomas. se calcula mediante el gasto que circula en cada uno de los tramos involucrados en el suministro de agua de dichas tomas, aplicando la ecuación de Bernoulli entre la cabecera de la red y cada una de las tomas, y la de continuidad en cada uno de los puntos en que se unen dos o más tramos.

Con un determinado número de tomas en operación, las incógnitas son el gasto en cada toma y la pérdida por fricción de cada tramo involucrado en el suministro de agua a las tomas. El sistema de ecuaciones que resulta puede expresarse en función del gasto. El número de ecuaciones es igual al número de tramos en funcionamiento (ecuaciones de continuidad), más el número de tomas que operan (ecuaciones tipo Bernoulli). En la solución del sistema de ecuaciones se aplica un procedimiento iterativo basado en el método numérico de Newton para sistemas no lineales (Morris, 1983).

- 2) Gasto total requerido. Con el número de tomas que operan simultáneamente se determina el gasto total requerido, y en caso de que éste sea mayor que el total disponible, se hace una redefinición de las tomas en operación.
- 3) Tiempo y volumen de riego. Para cada toma se estima el tiempo de operación, así como el volumen aplicado, de acuerdo con su área de influencia, con la lámina de riego necesaria y con el gasto que proporciona la toma.
- 4) Salida de resultados. Fecha de aplicación del riego, parcela a regar, hora inicial y final del riego, tiempo de riego, gasto utilizado; volumen aplicado, días de retraso con respecto a la fecha requerida (tiempo de espera).

### Resultados

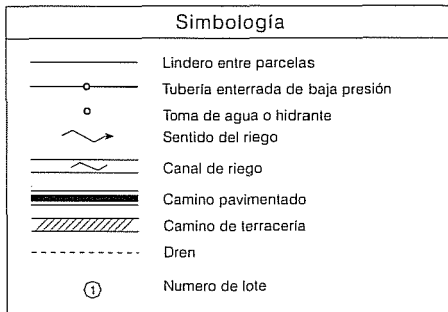
#### *Necesidades de riego*

El balance global de humedad del suelo se efectuó para una capa de 60 cm de profundidad, ya que entre 50 y 60 cm se detectó una capa dura, denominada "piso de arado", que dificultaba el humedecimiento del suelo. La textura predominante en esa capa fue franco-arcillosa y franco-arcillo-arenosa, cuya fracción volumétrica promedio de agua aprovechable fue de  $0.184 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ .

Los cultivos con mayor necesidad de riego fueron maíz (*I-P*), jitomate, sorgo y trigo, para fechas de siembra entre invierno y primavera. El menor intervalo crítico fue de nueve días para maíz (*I-P*), jitomate, sorgo y papa, y de 13 para trigo y soya. Las láminas de riego requeridas por los cultivos anteriores fueron: 10.6 cm para trigo durante el intervalo crítico; el maíz, 9.0; el jitomate, 7.9, y el sorgo, 7.3 cm. La eficiencia de aplicación de riego considerada fue de 80 por ciento.

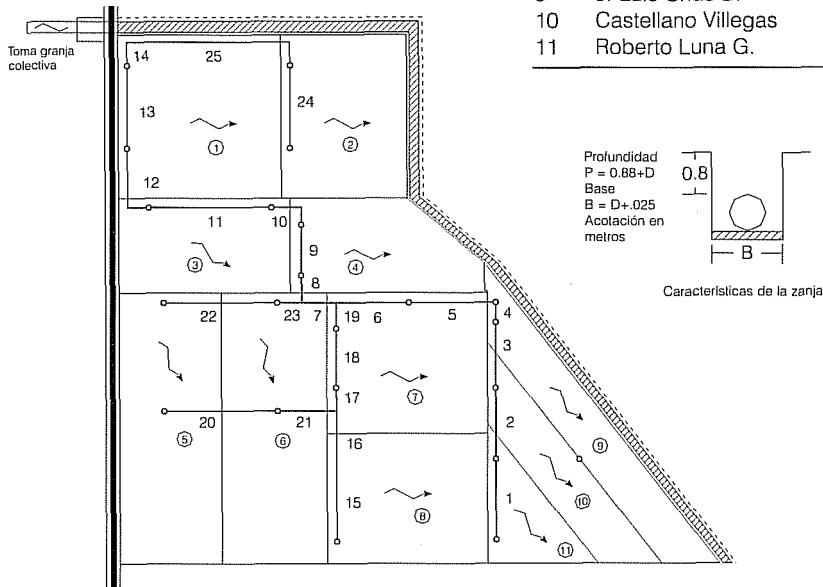
En resumen, para fines de diseño de la red de distribución se consideró una lámina bruta de riego de 10 cm y un intervalo crítico de nueve días.

1. Red de distribución para riego a demanda libre



Relación de usuarios		
Lote	Usuarios	Superficie (ha)
1	Hideliza Ramírez	8.41
2	José Zárate R.	6.09
3	Valentín E. López D.	6.30
4	Hugo A. Hernández C.	6.02
5	Rafael Orduño V.	8.39
6	Espiridión Castro A.	8.39
7	Trinidad Valdés V.	7.25
8	Pedro Ruíz N.	6.69
9	J. Luis Urías B.	3.78
10	Castellano Villegas	3.71
11	Roberto Luna G.	2.66

Características de la red				
Tramo	Gasto (Ls <sup>-1</sup> )	Longitud (m)	Diámetro (m)	
1	100	144.0	0.315	
2	100	141.0	0.315	
3	100	68.0	0.315	
4	100	120.5	0.250	
5	100	148.5	0.315	
6	100	205.5	0.315	
7	200	74.5	0.400	
8	200	60.0	0.500	
9	200	55.0	0.500	
10	200	106.0	0.500	
11	200	122.0	0.500	
12	200	154.0	0.500	
13	200	146.0	0.500	
14	300	69.3	0.500	
15	300	3.7	0.700	
16	100	110.0	0.250	
17	100	40.0	0.250	
18	100	35.6	0.315	
19	100	46.0	0.400	
20	100	126.0	0.400	
21	100	61.0	0.400	
22	100	178.0	0.315	
23	100	24.3	0.315	
24	100	66.7	0.400	
25	100	178.0	0.400	
		31.0	0.400	
		23.2	0.250	
		120.8	0.315	
		263.0	0.315	



Proyecto de la red

En este artículo sólo se presentan los resultados para la red del Trazo 4 (trazo por lindes para riego con tubería de compuertas), cuya localización de tomas se muestra en la ilustración 1.

Tiempo efectivo de riego (Ter). Resultó de 7.8 días efectivos de riego (187.2 h) durante el intervalo crítico.

Tiempo de riego promedio de operación por toma (Trt). Resultó de 8.95 horas.

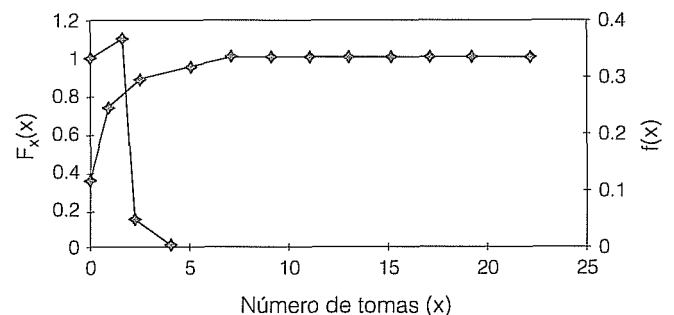
Probabilidad de funcionamiento de toma. Para fines de diseño de la red, se consideró un valor promedio de  $p$  por grupo de tomas; en las tomas de los lotes 9, 10 y 11 fue de 0.024 y de 0.053 para el resto.

Gasto de diseño de cada tramo. Los resultados se muestran en la ilustración 1.

De acuerdo con la función de distribución binomial utilizada en los diferentes trazos, del total de 21 tomas hay una probabilidad de 98% de que tres de ellas es-

tén funcionando, como se muestra en la ilustración 2. Esto se debe al bajo valor de  $p$ , lo que ocasiona que el área ubicada bajo la curva se acumule en los primeros valores. Dado que dicha distribución es totalmente asimétrica, no sería correcto ajustarla a una normal.

2. Función de probabilidad para los trazos 3 y 4



*Dimensiones de la red.* La longitud y el diámetro de cada tramo se muestran en la ilustración 1.

### Análisis de flexibilidad

Para la simulación de la red se consideró el padrón de cultivos anotado en el cuadro 2.

Los resultados de la simulación para el Trazo 4 se ilustran para las fechas con mayor lámina de riego por aplicar y con mayor superficie por regar (cuadro 3). De acuerdo con la demanda de riego, sólo en tres fechas de operación se requieren más de 24 horas para aplicar el agua necesaria. Esto significa que si en uno o más lotes que requieren riego, el agua se aplica a las 7:00 a.m., dicho riego debe continuar hasta después de las 7:00 a.m. del día siguiente, lo cual provocaría retrasos a los usuarios que en seguida requieran el agua. Puesto que esos retrasos no superan las 16 h, se concluye que la red es capaz de suministrar en su totalidad el agua demandada por los cultivos.

### 2. Padrón de cultivos con máxima demanda de agua

Lote	Cultivo	Fecha de siembra
1	Maíz	20 de febrero de 1994
2	Maíz	22 de febrero de 1994
3	Sorgo	25 de febrero de 1994
4	Trigo	18 de diciembre de 1993
5	Trigo	15 de diciembre de 1993
6	Trigo	17 de diciembre de 1993
7	Jitomate	10 de febrero de 1994
8	Jitomate	12 de febrero de 1994
9	Trigo	22 de diciembre de 1993
10	Trigo	21 de diciembre de 1993
11	Trigo	20 de diciembre de 1993

Situaciones similares presentaron los Trazos 1, 2 y 3. De las cuatro opciones, la red propuesta en el Trazo 3 provocó los menores retrasos, los cuales no superan las 3 h; sin embargo, la diferencia con los otros trazos es mínima.

### 3. Padrón de cultivos con máxima demanda de agua

Fecha (día, mes, año)	Toma	Lote	Hora inicial	Hora final	Lámina de riego (cm)	Gasto (Ls <sup>-1</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )	Tiempo total (h)	
1-12-1993	19	6	7.0	17.1	10.0	115.0	4195.0	20.2	
	17	6	7.0	17.1	10.0	115.0	4195.0		
20-2-1994	11	1	7.0	19.7	10.0	92.2	4205.0	23.4	
	10	1	7.0	17.7	10.0	108.9	4205.0		
	17	6	7.0	15.2	8.1	115.0	3398.0		
3-3-1994	19	6	15.5	24.7	8.1	102.8	3398.0	17.4	
	18	5	7.0	19.6	12.0	110.7	5034.0		
	16	5	7.0	19.6	12.0	110.7	5034.0		
5-3-1994	19	6	7.0	18.9	12.0	61.0	2613.2	29.6	
	17	6	7.0	18.9	12.0	117.5	5034.0		
	19	6	19.0	24.8	12.0	115.0	2420.8		
	4	9	7.0	13.4	12.0	98.2	2268.0		12.3
	5	9	14.0	19.9	12.0	106.8	2393.6		
	19	6	7.0	17.9	11.0	61.0	4614.5		
	17	6	7.0	17.9	11.0	117.5	2220.9		27.2
22-3-1994	19	6	18.0	23.4	11.0	115.0	2268.0		
	4	10	7.0	13.4	12.0	98.2	2226.0	12.2	
	4	10	14.0	19.8	12.0	106.8	3311.0		
23-3-1994	7	4	7.0	16.4	11.0	97.8	3311.0	17.2	
	6	4	7.0	14.8	11.0	117.5	2268.0		
	4	9	7.0	13.6	12.0	95.7	2268.0		
	5	9	14.0	20.3	12.0	100.0	2268.0		
11-5-1994	9	3	7.0	14.5	9.8	115.0	3087.0	16.1	
	8	3	15.0	23.6	9.8	100.0	3087.0		
	12	8	7.0	13.8	7.4	101.4	2475.3		6.8



En el caso hipotético de que la red del Trazo 4 deba aplicar una lámina de 12 cm en todos los lotes y en la misma fecha, el tiempo de operación de la red sería de 3.3 días. En un caso como éste unos usuarios pueden adelantar un día el riego, otros aplicarlo oportunamente, y el resto retrasarlo un día; es decir, la imprecisión en la oportunidad del riego sería de un día.

En contraste, el tiempo de riego requerido por la red actual de canales sin revestir para el mismo caso hipotético, es de casi 4.3 días de riego, más el tiempo necesario para hacer los cambios. Puesto que la red de canales funciona para riego por turnos, se requiere de una mayor organización entre los usuarios para contrarrestar la poca flexibilidad de la red, la cual se manifiesta en su lentitud de respuesta al pasar el agua de un usuario a otro, sobre todo cuando los lotes no están juntos. No es el caso de una red que emplee tubería de baja presión, donde la respuesta es casi inmediata, independientemente de la ubicación de las tomas

## Conclusiones

El modelo de balance de humedad en el suelo permitió encontrar de manera sencilla el intervalo crítico de riego y la lámina por aplicar, para fines de diseño de la infraestructura hidráulica.

Al definir el gasto de diseño en cada tramo de la red, la máxima probabilidad de operación de las tomas resultó ser el 5.3 % en promedio, con un total de 21 tomas, por lo que no fue adecuado aplicar la fórmula de Clement para estas condiciones, decidiéndose aplicar directamente la función de distribución binomial, de acuerdo con el procedimiento descrito.

El análisis de flexibilidad de la red para un padrón de cultivos con máxima demanda de agua, y con las fechas de siembra recomendadas, indicó que todas las opciones de trazos planteados fueron capaces de aplicar el agua requerida sin ocasionar retrasos superiores a un día.

La red del Trazo 4, que fue un trazo por lindes para riego con tubería de compuertas, requirió de 3.3 días para aplicar una lámina de 12 cm, tiempo inferior al requerido por la red actual, que es de aproximadamente de 4.3 días. La flexibilidad en el manejo de la red con base en tubería es superior a la de la red actual, al permitir una distribución del agua prácticamente a demanda libre, en el supuesto de que el agua esté disponible las 24 horas.

Recibido: junio, 1997  
Aprobado: marzo, 1998

## Referencias

- Brukler L, F. Lafolie y F. Tardieu. 1991. Modeling root water potential and soil-root water transport. Vol. II. Field comparisons. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 55:1213-1220.
- Campbell, G.S. y R. Díaz. 1986. *Simplified soil water balance models to predict crop transpiration*. Pullman, WA, USA.: Washington State University. Dept. Of Agronomy and Soils.
- Doorenbos, S. y W.O. Pruitt. 1976. *Las necesidades de agua de los cultivos*. Estudio FAO: Riego y Drenaje. Vol. 24. Roma.
- García, E. 1973. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Feddes, R.A., S.P. Neuman, y E. Bresler. 1975. Finite element analysis of two-dimensional flow in soils considering water uptake by roots. II. Field applications. *Soil Sci. Am. Soc. Proc.* 39:231-237.
- Gómez M., B. 1985. *Estudio agroclimatológico del sur de la llanura del Pacífico*. Bogotá, Colombia: Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras.
- Granados, A. 1990. *Infraestructura de regadíos. Redes colectivas de riego a presión*. España: E.T.S. de ingenieros de caminos, canales y puertos.
- Infante G.S., S. y G.P. Zárate De L. 1990. *Métodos estadísticos: un enfoque interdisciplinario*. México: Ed. Trillas.
- Labye, Y. 1966. Etude des procédés de calcul ayant pour but de rendre minimal le coût d'un réseau de distribution d'eau sous pression. *La Houille Blanche* no. 5. Francia.
- Lafolie, F., L. Bucker y F. Tardieu. 1991. Modeling root water potential and soil-root water transport: I. Model presentation. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 55:1203-1212.
- Luján G., J. 1992. *Eficiencia del riego*. Madrid, España: Centro de Estudios Hidrográficos. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, CEDEX.
- Magaña S., G. 1991. *Caracterización agroecológica del municipio de Tamazula, Jalisco, y zona de influencia*. Tesis Profesional. Chapingo, México: Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Irrigación.
- Melo A., J. 1989. *Diseño, construcción y evaluación preliminar de un sistema de drenaje para caña de azúcar en la región de Cosamaloapan, Veracruz*. Tesis de Maestría en Ciencias. Montecillo, México: Colegio de Postgraduados. Centro de Hidrociencias.
- Morris, J.L.L. 1983. *Computational methods in elementary numerical analysis*. Great Britain: John Wiley & Sons.
- Neuman, S.P., R.A. Feddes y E. Bresler. 1975. Finite element analysis of two-dimensional flow in soils considering water uptake by roots. I. Theory. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 39:224-230.
- Ortiz S., C.A. 1987. *Elementos de agrometeorología cuantitativa*. Chapingo, México: Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Suelos.

Reyes S., J. 1991. *Sistema basado en conocimiento para determinar cuándo y cuánto regar*. Tesis de Maestría en Ciencias. Montecillo, México: Colegio de Postgraduados. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. (SARH-INIFAP) 1987. *Guía para la asistencia técnica agrícola*. Área de influencia del Campo Agrícola Experimental "Valle del Fuerte". Centro de Investigaciones

Agrícolas del Pacífico Norte. Campo Agrícola Experimental Valle del Fuerte. Los Mochis, Sin., México.

Syring, K.M. 1990. A simple water regime model. En: J. Richter (Editor). *Models for processes in the soil. Programs and exercises*. Cremlingen, West Germany: Catena- Paperback.

Van Bavel, C.H.M. y J. Ahmed. 1976. Dynamic simulation of water depletion in the root zone. *Ecol. Modelling* 2:189-212.

#### Abstract

Magaña G; B. de León; C. Fuentes; L. Rendón "Flexible farm irrigation water distribution using low pressure pipelines". *Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish)* Vol. XIII. Num. 3, pages 35-43. September-December, 1998.

A procedure for an uniform water distribution system using low pressure pipelines is presented in this paper. Benefits include increased flexibility and efficiency of water distribution. A model of water demand was developed, and a procedure was defined to determine the capacity of the system. A computer program was also developed to simulate the system operation and flexibility. The project was carried out in the Irrigation District 076 Carrizo Valley, Sinaloa, at interfarm off-take level. Four options were analyzed: two with siphon irrigation and two with gated pipes; in both cases pipeline layouts were evaluated in accordance with field boundaries, and to optimize the pipe lengths and costs. Analysis of flexibility under maximum demand conditions for the recommended crops and planting dates showed that the four options had a maximum delay of 10 hours with respect to the farmer's application. In the hypothetical case that all users request a 12 cm depth of water on the same date, a total irrigation time of 3.3 days would be required.

**Key words:** Irrigation flexibility, water distribution networks, irrigation requirements, low pressure.

#### Dirección institucional de autores:

Gustavo Magaña Sosa  
Benjamín de León Mojarro  
Carlos Fuentes Ruiz  
Luis Rendón Pimentel

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua  
Paseo Cuauhnáhuac No. 8532 Col. Progreso  
Jiutepec, Morelos CP. 62550  
Teléfono: (73) 19 45 45 y 19 44 45  
Email: bleon@riego.imta.mx  
Email: cfuentes@tlaloc.imta.mx  
Email: lrendon@riego.imta.mx