



# Gráficas para el diseño hidráulico óptimo de sistemas de riego por goteo de baja carga

E. Vázquez-Fernández y P. López-Tellez  
*Instituto de Ingeniería, UNAM*  
E-mail: [ernesvf@servidor.unam.mx](mailto:ernesvf@servidor.unam.mx)

(recibido: agosto de 2001; aceptado: diciembre de 2002)

## Resumen

Se presentan gráficas para el diseño óptimo de sistemas de riego por goteo de baja carga con mangueras de 17 mm de diámetro externo y goteros de inserción tipo laberinto O-Tif de gasto pequeño. El diseño consiste en obtener el número óptimo de laterales una vez establecidas las separaciones entre estos y los emisores. Las gráficas se obtuvieron con ayuda de un modelo matemático para redes abiertas de tuberías que fue calibrado a partir de la información de longitudes máximas del lateral de goteo incluida en la hoja técnica del fabricante, con uniformidad de emisión de 0.90 en terreno plano. Los sistemas pueden ser fijos o móviles para el riego de hortalizas o cultivos con separaciones entre plantas de 0.3 a 0.8 m y de 0.5 a 3.2 m entre laterales, con gastos promedio de 1.39 l/h para goteros de color negro. La carga en el tanque de alimentación o cabezal es de 1.5 m. Las áreas de riego van desde 750 hasta 6780 m<sup>2</sup> y los costos unitarios de 1.1 a 13 \$/m<sup>2</sup>.

Descriptores: riego por goteo, cabezal, lateral, goteros de inserción.

## Abstract

*In this article are shown the graphics for the best design of dropping irrigation systems of low head with 17 mm of external diameter hoses and O-Tiff type insertion droppers of low outlay. The design consists in getting the minimum number of laterals once the space between these and the droppers is established. The graphics were obtained by using a model for open networks of pipes adjusted with the information for top lengths of the dropping lateral included on the manufacturer's technical sheet with an 0.90 emission uniformity for flat ground conditions. The systems can be fixed or mobile (from 0.5 to 3.2 m between laterals) to irrigate orchards or farmings with its plants separated from 0.3 to 0.8 m with an average expenditure of 1.39 L/hr for black droppers. The load on the feed-tank (or bolster) is of 1.5 m. The irrigation areas may fluctuate between 750 up to 6 780 m<sup>2</sup> and the costs from 1.1 to 13 \$/ m<sup>2</sup>.*

*Descriptores: rashly for drip, compress, wings, droppers of insertion.*

## Introducción

La instalación de sistemas móviles de riego por goteo de baja carga, tiene aproximadamente dos

años de haberse iniciado en México. Son móviles porque cada manguera lateral riega varias líneas de plantas en diferentes tiempos (Polak *et al.*, 1997); esto los hace más económicos a cambio de

incrementar el tiempo total de riego y, en algunos casos, el pago de jornales de trabajo. En una segunda etapa, se han instalado en parcelas demostrativas sistemas fijos y semifijos (aquellos que riegan a dos líneas de plantas por día) con el empleo de una doble manguera distribuidora conectada en "U" directamente al cabezal, como se muestra en la figura 1 (Vázquez *et al.*, 2000), lo cual permite regar mayor área por la mejor distribución de la carga hidráulica. Los sistemas resultaron muy redituables económicamente, por lo que se espera que la demanda de ellos se haga en forma extensiva en los próximos años, sobre todo en zonas áridas y semiáridas del país.

El uso de los goteros de laberinto se debe a la emisión de gastos pequeños con buena uniformidad, lo que permite regar áreas aproximadas en terreno plano hasta de 6780 m<sup>2</sup> con una carga en el cabezal de 1.5 m, si la separación entre emisores es de 0.8 m y de 3.2m entre laterales. Los goteros son desmontables, es decir, se puede quitar la parte superior de emisión sin necesidad de desprenderlos de la manguera, y tienen la ventaja de que no se obstruyen con facilidad. Su desventaja es un mayor

costo con respecto a los goteros integrados en mangueras; sin embargo, estos últimos son muy sensibles a la obstrucción.

En el sudeste asiático se emplean mangueras perforadas con agujas de 0.7 mm de diámetro (Polak *et al.*, 1997); amén de ser muy bajo el costo de los sistemas, en México no tuvieron buena aceptación por parte de los agricultores. Los gastos de emisión son mayores a los de los goteros de fábrica, lo que reduce el área de riego para conservar un cierto valor de la uniformidad de emisión, y esta última no llega a ser mayor de 80% porque la perforación a mano, con sacabocados de 1.19 mm de diámetro en México, fue de baja calidad.

El objetivo del trabajo es proporcionar una herramienta práctica de diseño hidráulico, útil para el técnico agrícola y los pequeños propietarios que deseen instalar sistemas de riego por goteo de baja carga sobre terrenos planos.

Los sistemas fijos o móviles que se pueden diseñar con las gráficas, sirven para regar cultivos como hortalizas o de otro tipo que tengan una separación entre plantas de 30 a 80 cm.

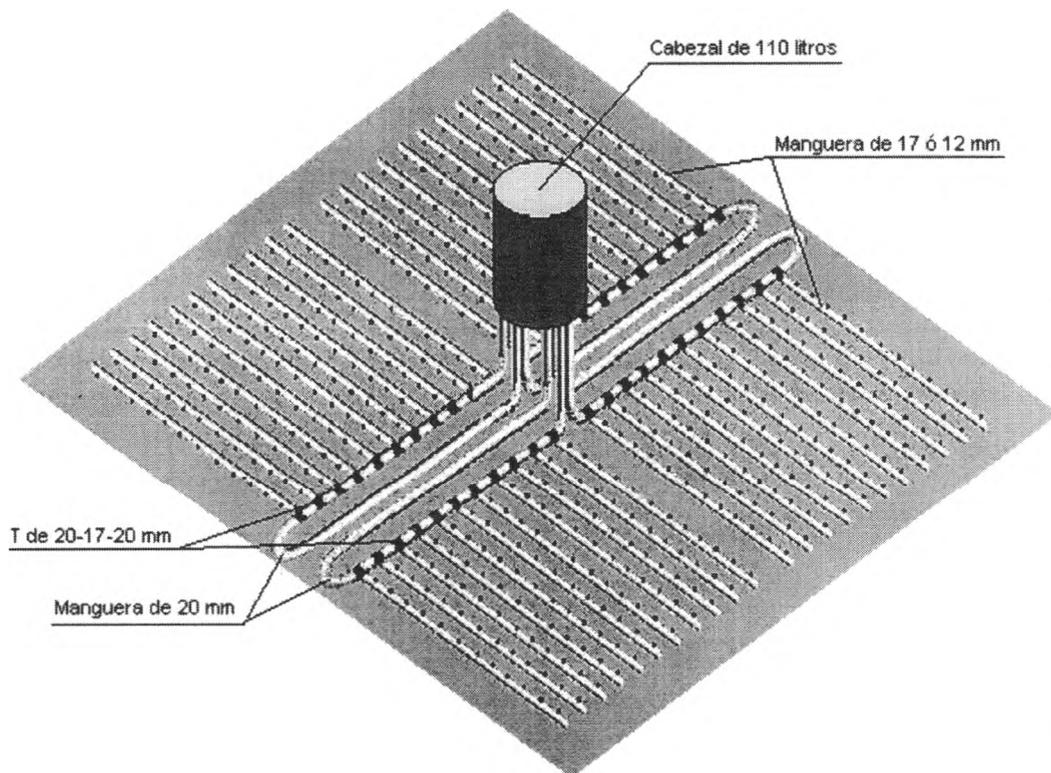


Figura 1. Sistema de riego por goteo de baja carga con doble manguera distribuidora

## Materiales y métodos

En las figuras 2 y 3 se muestra una comparación de costos unitarios para sistemas con diferentes separaciones entre emisores, laterales de 12 y 17 mm de diámetro externo y goteros O-Tif de color negro, respectivamente; incluyen mangueras (distribuidoras y laterales), conexiones "T", anillos terminales y goteros. Se observa que los costos son similares, debido a que los sistemas con el último diámetro riegan más área, ya que la longitud máxima es mayor, por ello es preferible el

diseño con estos laterales. Los diámetros internos empleados en el cálculo numérico para las mangueras de 12 y 17 mm son 9.8 y 13.6 mm, respectivamente.

La manguera de los laterales de 17 mm de diámetro exterior tienen un costo aproximado de 1.25 \$/m. La de 12 mm de 1.05 \$/m. Las mangueras distribuidoras son de 20 mm de diámetro exterior, con un costo de 2.35 \$/m. Los goteros tiene un costo de 1.50 \$/pieza. Las conexiones "T" de 4.5 \$/pieza y los anillos terminales de 1 \$/pieza.

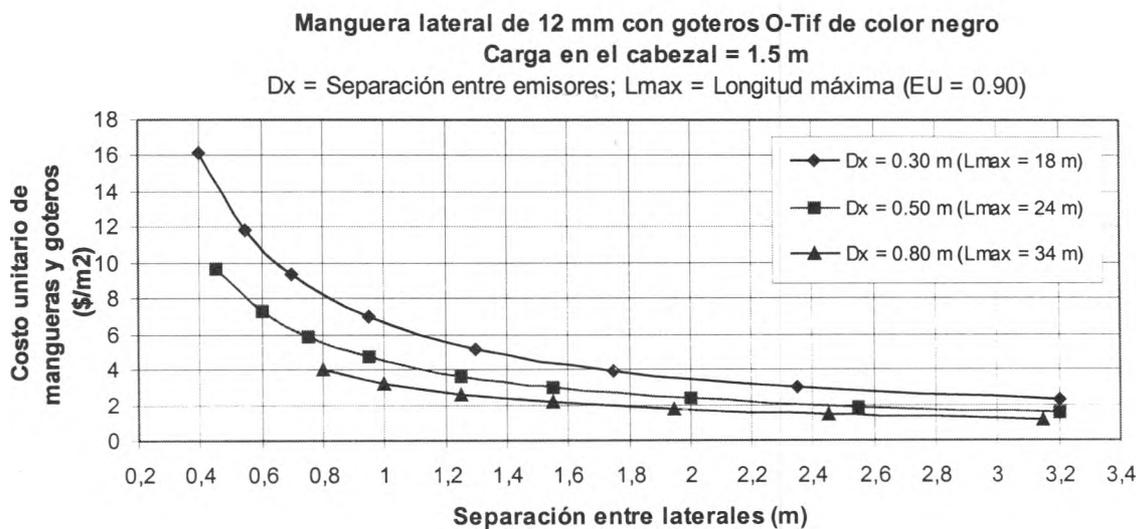


Figura 2. Costo unitario con manguera de 12 mm de diámetro exterior

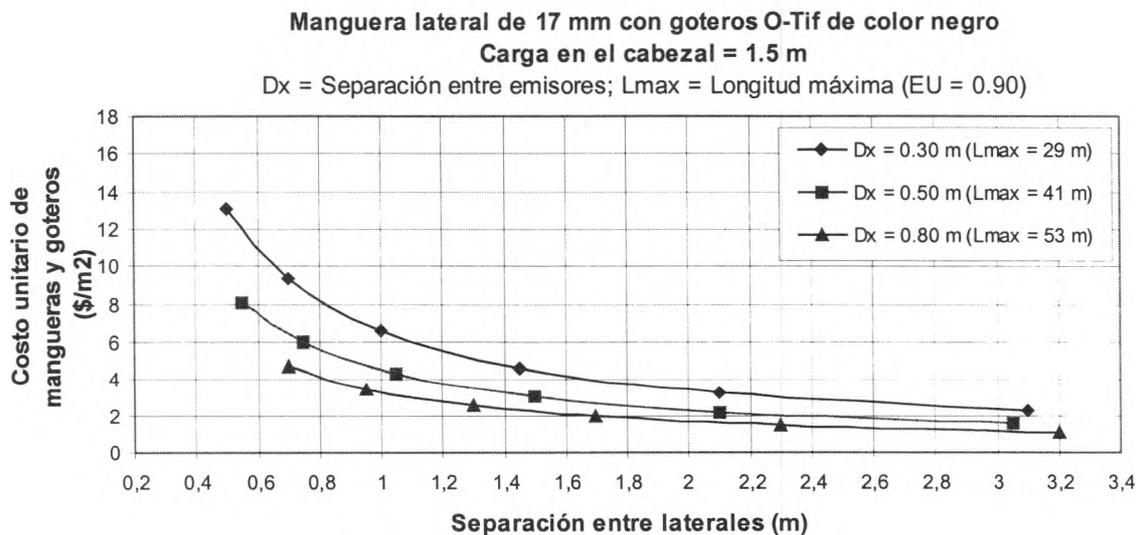


Figura 3. Costo unitario con manguera de 17 mm de diámetro exterior

En las figuras 4 y 5 se muestran las gráficas para el diseño con mangueras de 17mm, para separaciones entre emisores de 0.3, 0.5 y 0.8 m, con longitudes máximas de lateral de goteo de 29, 41 y 53 m, respectivamente. Éstas se miden a cada lado de las mangueras distribuidoras. La uniformidad de emisión para todo el sistema es de 0.9. En la hoja técnica del fabricante (Cydsa Plásticos Rex-Plastro) las longitudes máximas son de 39, 56 y 78 m para la misma uniformidad de emisión, pero ésta corresponde a un solo lateral.

Tanto en la figura 4 como en la 5 el parámetro de entrada en el eje horizontal es la separación

entre laterales. Con la primer gráfica se obtiene el número óptimo de laterales y con la segunda el área máxima de riego.

El procedimiento de diseño consiste en emplear la gráfica de la figura 4 una vez conocida la separación entre laterales, la cual depende de la cantidad de líneas de plantas que conviene regar cada cierto tiempo, para determinar el número óptimo de laterales. Con este último y la longitud máxima de los laterales es posible calcular el área exacta de riego con la ecuación

$$Ar = 2L \max(NI)(SI) \quad (1)$$

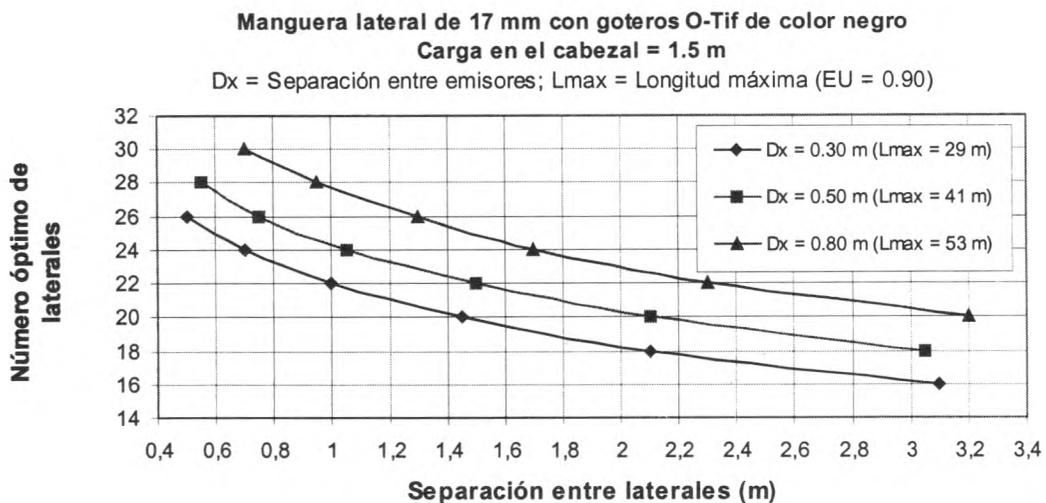


Figura 4. Gráfica para el diseño de los laterales

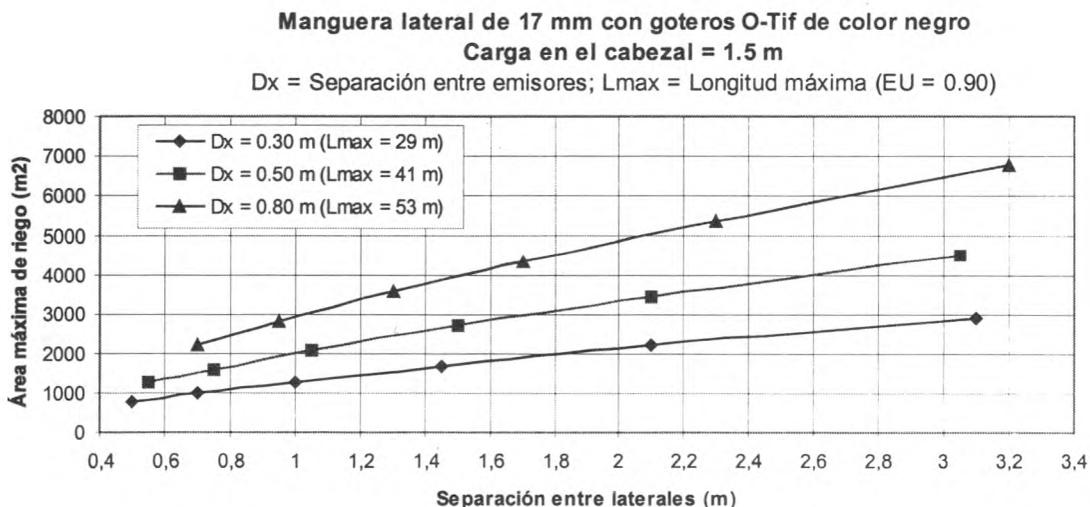


Figura 5. Áreas máximas de riego

donde  $A_r$  es el área máxima de riego, en  $m^2$ ;  $L_{max}$  la longitud máxima de lateral de goteo, medida a partir de cada manguera distribuidora, en m;  $N_l$  el número óptimo de laterales, adimensional;  $S_l$  la separación entre laterales, en m.

Sin embargo, con la figura 5 se obtiene la suficiente aproximación para el área máxima de riego.

En el cálculo de la uniformidad de emisión (EU) se utilizó la ecuación dada por Cuenca (1989) para un solo gotero por planta

$$EU = (1 - 1.27CV) \frac{Q_{min}}{\bar{Q}} \quad (2)$$

donde CV es el coeficiente de variación de fábrica del emisor;  $Q_{min}$  el gasto mínimo en el sistema;  $\bar{Q}$  el gasto promedio. Dado que se desconoce el CV del fabricante, se usó el estadístico resultante de los gastos de emisión calculados con el modelo matemático, esto es,  $CV = \sigma / \bar{Q}$  donde  $\sigma$  es la desviación estándar de los gastos calculados.

Por otra parte, la curva cargas-gastos hallada en el laboratorio para los goteros O-Tif de color negro, en un intervalo de cargas de 0.3 a 2 m es

$$Q = 1.36h^{0.53} \quad (3)$$

donde Q es el gasto de emisión, en l/h; h es la carga sobre el gotero, en m.

El modelo numérico (Vázquez, 2001) que fue evaluado de manera muy aceptable con mediciones en el campo, emplea las ecuaciones 2 y 3, así como datos variables del coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach, según el régimen del flujo.

Si el flujo es laminar ( $Re < 2300$ ), el cual ocurre en el 90% de los tramos entre goteros o cruceros de los sistemas, se usa la recta de Poiseuille (Sotelo, 1974)

$$f = \frac{64}{Re} \quad (4)$$

donde  $f$  es el coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach;  $Re$  es el número de Reynolds.

Para el cálculo del  $Re$  se utilizó una viscosidad cinemática  $\nu = 1 \cdot 10^{-6} m^2 / s$ , que corresponde a una temperatura del agua de 20 °C.

Si el flujo es turbulento ( $Re \geq 3000$ ) se emplea la ecuación propuesta por Bagarello *et al.* (1995) para tubos de polietileno de 16, 20 y 25 mm, ésta es

$$f = \frac{0.302}{Re^{0.25}} \quad (5)$$

Para la zona crítica ( $2300 < Re < 3000$ ) se empleó un coeficiente  $f = 0.04$ , que es el valor más alto para flujo turbulento.

Con respecto al coeficiente de pérdida local en el gotero, se adoptó el valor  $\alpha = 0.6$ , obtenido por Bagarello *et al.* (1997) para goteros de inserción poco penetrantes, como los O-Tif.

El gasto promedio resultante para cualesquier separación entre emisores y laterales de la figura 4 es de 1.39 l/h. Con éste es posible estimar el tiempo de riego mediante la ecuación

$$Tr = \frac{D(Ap)}{Qe} \quad (6)$$

donde  $Tr$  es el tiempo de riego, en h;  $D$  la dosis por infiltrar, en mm;  $Ap$  el área a humedecer, en  $m^2$ ;  $Qe$  el gasto del emisor, en l/h. En estos sistemas para parcelas pequeñas  $Qe = \bar{Q}$ . Con el fin de estimar el tiempo de riego máximo, supóngase que la dosis corresponde a los días de máxima evapotranspiración durante el ciclo vegetativo.

## Ejemplos numéricos

1. Se desea diseñar un sistema fijo para el cultivo de hortalizas con las características de mangueras y goteros dadas por las gráficas de las figuras 4 y 5. Las separaciones son de 0.3 m entre emisores y 0.7 m entre laterales. Se supone que en la determinación de dichas separaciones se consideraron el cultivo y el tipo de suelo. La dosis por infiltrar en los días de máxima evapotranspiración, es en este caso de 6 mm/día. Por último, no hay restricción con respecto al tamaño de la parcela.

De la figura 4 se obtiene que el número óptimo de laterales es igual a 24. Dado que la longitud máxima de lateral de goteo es de 29 m, el número total de emisores es  $N_e = 2(29/0.3)24 = 4656$ .

De la figura 5, el área máxima de riego tiene un valor aproximado de 1000 m<sup>2</sup>.

En la figura 3 se encuentra un costo unitario aproximado para las mangueras y goteros, incluidas las conexiones "T" y anillos terminales, de 9.4 \$/m<sup>2</sup>. A este costo habría que agregarle el del cabezal, con sus adaptadores o conexiones, válvula y filtro.

El sistema deberá instalarse como se indica en la figura 1, donde las mangueras distribuidoras se conectan directamente al cabezal que se localiza en el centro del área.

Con base en la ecuación 6, si el riego se aplica cada dos días y la dosis es de 12 mm, se obtiene el siguiente tiempo de riego

$$T_r = \frac{12(\pi / 4)(0.3)^2}{1.39} = 0.6 \text{ h}$$

El gasto total para satisfacer el riego en la parcela es  $Q_t = 4656(1.39) = 6472 \text{ l/h} = 1.8 \text{ l/s}$ .

2. Supóngase el diseño de un sistema móvil para el mismo cultivo del ejemplo 1. Si cada lateral alimenta a dos líneas de plantas (sistema semifijo) por lado, la separación entre laterales es de  $2(0.7) = 1.4 \text{ m}$ . El riego se aplica cada dos días.

De la figura 4, el número óptimo de laterales es igual a 20. El número total de emisores es  $N_e = 2(29/0.3)20 = 3880$ .

De la figura 5, el área máxima de riego, aproximada, es de 1600 m<sup>2</sup>. Con respecto a la parcela del ejemplo 1, el área se incrementa 1.6 veces.

De la figura 3, el costo unitario aproximado de las mangueras, goteros, conexiones "T" y anillos terminales es de 4.7 \$/m<sup>2</sup>, que es la mitad del correspondiente al ejemplo 1.

El tiempo de riego, instalados los laterales a uno y otro lado de las mangueras distribuidoras, es el doble que el del ejemplo 1, es decir,  $T_r = 1.2 \text{ h}$ .

El gasto total que requiere la parcela es  $Q_t = 3880(1.39) = 5393 \text{ l/h} = 1.5 \text{ l/s}$ .

3. Se desea diseñar un sistema móvil con los datos del ejemplo 1, pero con la separación entre laterales igual a cuatro veces, esto es  $4(0.7) = 2.8 \text{ m}$ , debido a que cada lateral alimenta a cuatro líneas de plantas por lado. El riego es diario.

Según la figura 3, el costo se reduce a 2.4 \$/m<sup>2</sup>, aproximadamente la cuarta parte del costo para el ejemplo 1.

En comparación con los sistemas fijos existentes en el mercado, dicho costo es del orden de 15 a 30% de los comerciales.

Ahora bien, si cada lateral riega dos líneas de plantas por día, y el riego se aplica diario, la dosis sigue siendo de 12 mm; además, el tiempo de riego también es de 1.2 h, como en el ejemplo 2, pero el gasto total se reduce a la mitad porque ésta es la reducción del número de goteros; así,  $Q_t = (3880/2)(1.39) = 2697 \text{ l/h} = 0.75 \text{ l/s}$ .

Este último gasto es muy pequeño, lo cual tiene la ventaja de que, en caso de haber una disponibilidad de agua menor a 1 l/s, todavía es posible regar el área total aproximada de 1600 m<sup>2</sup> con un sistema móvil de menor costo.

## Discusión

No obstante que en el 90% de los tramos empleados en el cálculo el flujo de agua en las mangueras es laminar, se ha visto en el campo que el funcionamiento hidráulico es muy aceptable, con uniformidades de emisión próximas al 80%, que aún son admisibles para parcelas pequeñas.

El incremento del área de riego se debe a la instalación de las mangueras distribuidoras conectadas directamente al cabezal en "U", y al uso de mangueras laterales de mayor diámetro. Dado que los costos unitarios para las mangueras de 17 y 12 mm son muy semejantes, es preferible emplear las primeras.

Los tiempos de riego no son fijos para todo el ciclo vegetativo de la planta, se estiman según la variación de la evapotranspiración durante el

mismo. En los ejemplos numéricos se ha empleado la dosis correspondiente a los días de máxima demanda de agua. Dado que los intervalos de riego con este sistema varían de 1 a 4 días, los porcentajes de humedad son muy próximos al de capacidad de campo, por lo que se recomienda que el control de la humedad del suelo sea de manera sencilla, es decir, a través de un método indirecto; por ejemplo, con el uso de uno o dos tensiómetros, ya que a largo plazo resultaría más económico que con otros métodos.

El sistema es modular, esto es, puede replicarse para duplicar o triplicar el área de riego, pero cada módulo requiere su propio cabezal. Una opción más económica, si es que el riego no es simultáneo, sería hacerlo móvil al aumentar la separación entre laterales para que cada uno riegue a varias líneas de plantas, como se describe en los ejemplos numéricos; de esta manera se instalaría un sólo cabezal para todo el sistema.

### **Recomendaciones para la operación del sistema**

Con el fin de propiciar el funcionamiento correcto del sistema durante la vida útil de las mangueras (diez años, según el fabricante), conviene considerar las siguientes instrucciones.

- a) Emplear un filtro para eliminar los sólidos del agua antes de la entrada al tanque o cabezal, el cual debe limpiarse previamente a la aplicación de cada riego. Existen filtros económicos de 100 a 150 mesh que han demostrado su utilidad en algunos sitios.
- b) Instalar una válvula de flotador dentro del tanque para evitar derrames sobre él.
- c) Realizar un lavado en el interior de las mangueras antes del primer riego para eliminar el material sólido que se haya introducido durante la instalación del sistema.
- d) En los riegos posteriores, eliminar el aire atrapado en las mangueras abriendo los extremos para que salga el agua, junto con el aire, durante un tiempo breve. De preferencia,

evítese al terminar el riego que el tanque se vacíe completamente para que no se introduzca el aire. Asimismo, conviene colocar un pequeño tubo a manera de "jarro de agua" a la salida del tanque.

e) Colocar las mangueras con los goteros hacia arriba para evitar que se ensucien de lodo y se obturen.

f) Verificar que los goteros funcionen adecuadamente durante el riego.

g) Retirar con cuidado las mangueras después de cada ciclo vegetativo para volver a colocarlas antes de la siguiente siembra.

h) Mover con el suficiente cuidado las mangueras en los sistemas móviles para evitar el maltrato de las plantas y el desprendimiento de los goteros. En caso de que esto último suceda, es conveniente tener en reserva al menos un 2% del número total de goteros.

i) Los sistemas móviles se recomiendan para cultivos de porte pequeño, que permitan el movimiento de los laterales, sin dañar la planta.

### **Conclusiones**

Como se demostró en los ejemplos numéricos, el empleo de las gráficas para el diseño hidráulico de sistemas de riego por goteo de baja carga sobre terreno plano es simple, por lo que es una herramienta útil para los técnicos en riego y pequeños propietarios, quienes de acuerdo con las extensiones de tierra y recursos económicos disponibles podrán realizar los diseños. Además, en general, los distribuidores de materiales para riego por goteo acuden al departamento técnico de los fabricantes para diseñar sistemas semejantes a los descritos; sin embargo, dichos distribuidores no disponen de una herramienta práctica como las gráficas aquí presentadas, por lo que también podrían emplearlas.

Las gráficas permiten diseñar sistemas fijos o móviles. En estos últimos, la separación entre

laterales depende del número de líneas de plantas que se deseen regar por lateral.

Si se diseñan sistemas móviles los costos se reducen, lo cual es muy atractivo para los agricultores de escasos recursos económicos, pero debe evaluarse que requieren mayor tiempo de riego y de jornales.

En los ejemplos numéricos se encontró que los gastos totales para regar áreas del orden de 1000 m<sup>2</sup> con riegos cada dos días, resultan ser menores de 2 l/s si el sistema es fijo. En cambio, en los sistemas móviles, conforme cada lateral riegue mayor número de líneas de plantas, el gasto de alimentación se reduce, llegando a ser menor de 1 l/s, pero se requiere que el riego sea diario. Este resultado, no obstante de que el tiempo de riego puede aumentar, favorece el empleo de los sistemas móviles en zonas con poca disponibilidad de agua.

### Agradecimientos

A los ingenieros Laura Vélez Morales y Eugenio Morales Sevilla por su colaboración en las pruebas de laboratorio.

### Referencias

- Bagarello V., Ferro V., Provenzano G. y Dumo D. (1995). Experimental Study on Flow-Resistance Law for Small-Diameter Plastic Pipes. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 121, No. 5.
- Bagarello V., Ferro V., Provenzano G. y Dumo D. (1997). Evaluating Pressure Losses in Drip-Irrigation Lines. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 123, No. 1.
- Cuenca R.H. (1989). *Irrigation System Design*. Prentice Hall.
- Cydsa Plásticos Rex-Plastro (sin fecha). *O-Tif, gotero sobre la línea*. Hoja de datos técnicos.
- Polak P., Nanes B. y Adhikari D. (1997). A Low Cost Drip Irrigation System for Small Farmers in Developing Countries. *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 33, No. 1.
- Sotelo G. (1974). *Hidráulica general*. Editorial Limusa.
- Vázquez E. y Sifuentes M. (2001). *Modelo matemático para el diseño de sistemas de riego tecnificado de baja carga en parcelas pequeñas*. Ingeniería, Investigación y Tecnología, UNAM (en prensa).
- Vázquez E., Vélez L., de la Cruz R., López P. (2000). Diseño alternativo para el riego tecnificado en pequeñas parcelas. Memoria del 5° Symposium Internacional de Ferti-irrigación, Mérida, Yuc.

---

### Semblanza de los autores

*Ernesto Vázquez-Fernández*. Egresado de la UNAM, ha sido profesor de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco y de la DEPMI, UNAM. Asimismo se ha desempeñado como especialista en ingeniería hidráulica en los sectores público y privado. Actualmente labora en el Instituto de Ingeniería, UNAM.

*Pedro López-Tellez*. Egresado de la Universidad Autónoma Chapingo, ha laborado como especialista en irrigación y asesor técnico agrícola, en los sectores público y privado. Actualmente es pasante de maestría en ingeniería hidráulica en la DEPMI, UNAM.