

# **DISEÑO DE SISTEMAS DE RIEGO PRESURIZADO**



M. C. Abel Román López  
Ing. S. Felipe Mendoza Moreno  
Dr. Ignacio Sánchez Cohen  
Dr. Marco A. Inzunza Ibarra  
M. C. Leopoldo Moreno Díaz

**ISBN: 968-800-594-0**

**Folleto Científico No. 15**

**Gómez Palacio, Durango**

**Diciembre del 2004**

Editor: Ing. Raquel Anguiano Gallegos

# **DISEÑO DE SISTEMAS DE RIEGO PRESURIZADO**

M. C. Abel Román López  
Ing. Segundo F. Mendoza Moreno  
Dr. Ignacio Sánchez Cohen  
Dr. Marco Antonio Inzunza Ibarra  
M. C. Leopoldo Moreno Díaz

**CENID-RASPA**

Centro Nacional de Investigación Disciplinaria  
en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera.

Km 6.5 margen derecha Canal Sacramento  
Gómez Palacio, Durango. MÉXICO.

Apdo. Postal 41

35150 Cd. Lerdo, Dgo.

Teléfonos y Fax: 01 (871) 719-10-76, 719-10-77 y 719-11-34

e-mail: cenid.raspa@inifap.gob.mx

El contenido de esta publicación podrá reproducirse total o parcialmente con fines específicos de divulgación, siempre y cuando se dé el crédito correspondiente a los autores, al CENID-RASPA y al INIFAP.

ISBN: 968-800-594-0

## CONTENIDO

	Pág.
Introducción	1
Aspectos Generales	2
Aspectos básicos de hidráulica en sistemas de riego a presión	6
• Emisores	6
• Líneas regantes y distribuidores (Unidad de riego)	7
Diseño hidráulico en sistemas de riego a presión	8
Información previa	8
1. Diseño de la unidad de riego	12
2. Diseño de la tubería de conducción	16
Ejemplo de diseño de un sistema de riego por goteo en Nogal Pecanero	18
I. Cálculos agronómicos	19
II. Calculo hidráulico	21
2.1 Presión de operación ( $H_o$ ) de la unidad de riego	21
2.2 Perdida de carga permisible ( $\Delta H$ ) en la unidad de riego	21
2.3 Unidad de riego	21
2.4 Calculo de la tubería de conducción	24
2.5 Selección del cabezal de control	25
Literatura citada	29

## Presentación

El objetivo global del desarrollo moderno del riego debe considerar el mejor uso del agua en enlace con el recurso humano así como otros insumos esenciales como energía, maquinaria, fertilizantes y prácticas de manejo para incrementar la productividad de los cultivos. La selección del método adecuado de riego que se ajuste a cualquier combinación de condiciones físicas y socioeconómicas involucra consideraciones complejas. Así, donde existe carencia de capital, el objetivo será adecuar un método de riego que no involucre gran inversión; por otro lado, donde la limitante es agua, el objetivo obvio es incrementar la eficiencia de transformación de este insumo. También, la disponibilidad de energía y mano de obra juegan un papel preponderante en la selección del método de riego.

En este concepto, en las regiones áridas y semiáridas de México, la disponibilidad de agua es el factor que mayormente limita el desarrollo de la agricultura moderna. Es aquí en donde los sistemas de riego presurizado adquieren su mayor ventaja; sin embargo, el diseño apropiado de éstos es la esencia del buen funcionamiento y operatividad del equipamiento. En la presente publicación se ponen a disposición de técnicos, investigadores, productores y usuarios del riego en general, los fundamentos de diseño de sistemas de riego presurizado. Además, se presentan las ecuaciones básicas de hidráulica de tuberías así como algunas relaciones funcionales, adecuaciones e información generada en el Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua- Suelo-Planta-Atmósfera (CENID RASPA) y su antecesor, el Centro Nacional de Métodos Avanzados de Riego (CENAMAR). Para una mejor comprensión del documento se presenta un ejemplo de diseño que involucra lo anteriormente expuesto.

Dr. Ignacio Sánchez Cohen

Director del CENID-RASPA

# INTRODUCCIÓN

La escasez e incremento de los costos del agua para riego en las áreas agrícolas del país hace que los sectores académico, productivo y público en general cada día le den un mayor valor al agua, buscando mejores alternativas para su manejo; una de estas alternativas es el uso de sistemas de riego a presión, también conocidos como sistemas de riego presurizados, o sistemas de riego por conductos cerrados. A diferencia de los métodos tradicionales de riego en los que la aplicación está gobernada por la acción de la gravedad, en los sistemas de riego presurizados el agua se aplica por medio de tuberías en las que el fluido circula a una presión mayor que la presión atmosférica. Esto permite que el riego se realice con mayor eficiencia en varios sentidos. Primero, porque se puede controlar la cantidad de agua por aplicar a lo largo del terreno y se pueden reducir pérdidas de volúmenes que no son utilizados por los cultivos. Segundo, es posible aplicar de manera eficiente los fertilizantes en las dosis necesarias a lo largo del ciclo del cultivo. Tercero, Se reduce el uso de mano de obra especialmente en sistemas mecanizados o semi-automatizados.

No obstante, debe reconocerse que los costos de inversión y de mantenimiento de los equipos y sistemas pueden representar una barrera insalvable en algunos casos, por lo que su uso está limitado a aquellas condiciones donde la rentabilidad de los cultivos garantiza la amortización de estos costos. En este aspecto es de crucial importancia el diseño adecuado de estos sistemas. Aunque cada sistema de riego sigue procedimientos específicos para su diseño en algunos de sus componentes, existen criterios generales y fundamentales que alcanzan un amplio rango de generalización, mismos que se presentan en este capítulo. Para ello se ha enfocado la atención al diseño de un sistema de riego por goteo sobre una huerta de nogal pecanero, representativo de los sistemas de producción intensiva de las áreas de riego del país.

## Aspectos generales

El paradigma de los sistemas de riego presurizado es, además de incrementar la eficiencia de transformación del agua-producto, minimizar la posibilidad de daño al cultivo por escasez de agua y nutrimentos, mismos que tienen que suministrarse a bajas tasas pero periódicamente, e incrementar la relación beneficio-costo.

En el contexto de eficiencia de transformación, muchos procesos involucrados en la producción mantienen una relación muy baja en este sentido. Así por ejemplo, el siguiente cuadro muestra las cantidades de agua necesarias para la obtención del producto que se señala.

Cuadro 1: Eficiencias de transformación agua-producto de algunos bienes de consumo. (Fuente: World Water Resources Institute, 1993).

<b>Producto</b>	<b>Agua necesaria para su producción (L)</b>
1 Naranja	350-416
1 Huevo	454-568
1 Pieza de pan	1,135
1 Litro leche	500-3500
1 kilo carne	26,500
1 hamburguesa con papas	5,667
1 pantalón de algodón	6,813
1 camisa de algodón	1,514
El acero de un carro	121,120
El acero de una bicicleta de 13 kg de peso	1,816

En la obtención de los índices que se muestran en el cuadro anterior, la eficiencia de aplicación del agua de riego juega un papel preponderante, de aquí la importancia de la tecnificación del riego y la precisión del diseño. En este sentido, al seleccionar un sistema de riego se debe conocer la eficiencia factible de alcanzar para la proyección adecuada de la operación y costeo del sistema (tiempos de riego, volúmenes por aplicar, etc.). La Figura 1 muestra eficiencias de aplicación del agua para algunos sistemas de riego comunes.

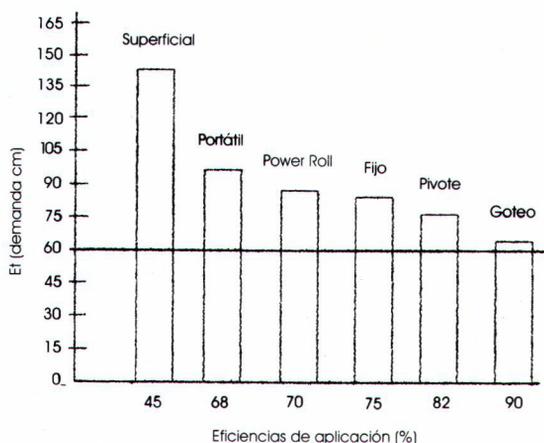


Figura 1. Cantidades adicionales de agua que habría que aplicar por concepto de la eficiencia de aplicación (Sánchez, 2004a).

En la figura anterior, la línea de demanda señala la cantidad de agua que requiere un cultivo (evapotranspiración), y la proporción del área de los recuadros por arriba de dicha línea indica la cantidad de agua adicional que se debe aplicar por concepto de la eficiencia del sistema de riego. Su valor promedio se encuentra entre paréntesis.

La investigación en el ámbito de la ingeniería del aprovechamiento del agua ha mostrado también que las eficiencias de transformación (comúnmente se manifiesta como productividad del agua de riego) pueden mejorarse sustancialmente al considerar el incremento en las

eficiencias de aplicación del agua de riego sin olvidar las buenas prácticas de manejo del cultivo. En este sentido, si en sistemas de riego tradicionales se observa el trazo y receta de riego (cuánto, cómo y cuándo regar), se pueden alcanzar eficiencias mayores del 45 por ciento que señala la Figura 1.

El Cuadro 2 presenta las eficiencias de transformación alcanzables en distritos de riego al pasar de sistemas tradicionales (rodado) a riego tecnificado (incluyendo riego superficial).

La investigación dentro de la ingeniería de riego tiene aún mucho que desarrollar; por ejemplo, es necesario establecer el vínculo con la investigación en mejoramiento y biotecnología para la planeación de estudios de campo en donde el suministro controlado de agua sea indispensable para el reforzamiento de las hipótesis de mejora en la tolerancia a déficit hídrico en especies de interés comercial. De igual manera, son necesarios los estudios de ingeniería económica del agua con el objetivo de optimizar la productividad de las cantidades restringidas de este elemento en términos de patrones de cultivo que maximicen el ingreso neto. Por último, la competitividad internacional en la globalización de los mercados sugiere la producción inocua de alimentos y de alta calidad nutritiva en donde los esquemas de ferti-irrigación con sistemas avanzados de suministro de agua adquieren relevancia.

**Cuadro 2. Eficiencias de transformación potenciales al sustituir los sistemas de riego tradicionales por sistemas tecnificados (Sánchez, 2004b).**

Dto. de riego	Productividad del agua de riego en sistemas tradicionales y riego tecnificado									
	Lámina de riego (m)		Rendimiento (t h <sup>-1</sup> )		Goteo		Dto. de riego		Productividad (kg m <sup>-3</sup> )	
	Superficial	Aspersión	Superficial	Aspersión	Goteo	Dto. de riego	Superficial	Aspersión	Superficial	Aspersión
Alfalfa	2.41	1.9	1.7	22.8	27.2	32.5	0.67	1.2	1.6	2.5
Maíz forrajero	1.25	1.0	0.6	25.0	21.7	30.02	1.25	2.5	3.5	4.17
Maíz grano	1.25	1.0	-	10.0	-	9.01	0.16	1	-	1.43
Chile	1.4	-	-	-	-	54.29	0.79	-	-	6.1
Melón	0.97	0.6	-	40.02	-	53.95	2.32	6.67	-	8.43
Sandía	0.97	0.8	-	30.4	-	67.83	2.9	3.8	-	13.3
Frijol	0.85	0.52	0.48	2.08	2.11	-	0.1	0.4	0.44	-
Girasol	0.8	0.63	-	3.97	-	-	0.2	0.63	-	-
Cártamo	0.8	0.53	-	2.39	-	-	0.14	0.45	-	-
Trigo	0.9	0.72	0.7	5.98	6.3	-	0.4	0.83	0.9	-
Trébol	-	1.2	-	14.04	-	-	-	1.17	-	-
alejandrocino	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tomate	1.2	1.2	-	-	-	99.94	1.5	-	-	13.88
Nogal	1.4	0.58	1.12	0.75	2.58	-	0.08	0.13	0.23	-
Sorgo	1.2	0.54	-	25.38	-	-	1.15	4.7	-	-
forrajero	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Algodón	1.2	-	-	-	-	5.99	0.33	0.87	-	0.95

**Notas**

- Las láminas de riego en el riego tecnificado se refieren a las láminas usadas al pasar del sistema de riego tradicional al sistema de riego indicado.
- Los rendimientos y láminas de riego en el riego tecnificado son datos de investigación validados en el CENID RASPA y en diferentes distritos de riego del país.
- Es el valor al que puede aspirar el productor.
- Las láminas de riego en los distritos de riego son las que comúnmente aplica el productor tradicional. Los rendimientos pueden variar en función del genotipo utilizado.
- El sistema de riego por goteo que se utiliza es tipo cintilla.
- El sistema de riego reportado en aspersión es como sigue: para alfalfa, maíz forrajero, frijol y trigo es tipo lateral con ruedas (power roll), para nogal es microaspersión;
- sin embargo, se estima que al cambiar de tipo de aspersión no afectaría sustancialmente la productividad.

## Aspectos básicos de hidráulica en sistemas de riego a presión.

Un sistema de riego a presión se comporta como un conducto cerrado en donde el agua se mueve por el efecto de un gradiente de presión (Gómez, 1974, 1975; Christiansen, 1942); dicho sistema está integrado por unidades de riego con emisores (goteros, aspersores, microaspersores, etc.), líneas regantes y distribuidores; tubería de conducción y el cabezal de control. En el diseño del sistema es necesario conocer las características de funcionamiento hidráulico de tales componentes para que así se alcance una aplicación y distribución del agua de riego eficientes, menores costos de operación y mayor uniformidad mejoran la producción, tanto en rendimiento por unidad de superficie como en los parámetros de calidad.

### Emisores

Debido a que el diseño hidráulico, operación y mantenimiento de los sistemas de riego a presión dependen de las características de funcionamiento hidráulico de los emisores, estos son la parte fundamental en dichos sistemas de riego, hidráulicamente los emisores se rigen por la siguiente función potencial utilizada por décadas (Keller y Karmeli, 1974; Peña *et al.*, 1978; Burt y Stuart, 1994).

$$q = K H^x \quad 1$$

Donde:  $q$  representa el gasto del emisor ( $L h^{-1}$ ),  $K$  simboliza el coeficiente que depende de la geometría del emisor,  $H$  significa la carga hidráulica (m) La variable  $H$  se expresará en metros de columna de agua (MCA). Para fines prácticos, en lo sucesivo estas unidades se referirán simplemente como metros y  $x$  es el exponente que depende del régimen de flujo (adimensional).

**Geometría del emisor.** Debido a las pequeñas áreas de paso que poseen los emisores, cualquier obstrucción por inserción y/o cambios de temperatura en la misma, hace que el gasto de salida se vea afectado. Este aspecto es importante sobre todo en goteros, microtubo, cintilla, etc., en donde se encuentran áreas de paso de 0.5 a 2 mm<sup>2</sup>; esto aunado al material de fabricación y a las temperaturas de campo, las cuales pueden variar de 5 a 45 °C. El coeficiente  $K$  de la Ecuación 1 depende del área de paso del emisor, a mayor área mayor será su valor; en el Cuadro 3 se muestran valores de  $K$  para diferente tipo de emisores.

**Régimen de flujo.** Por el tipo de flujo los emisores se clasifican en emisores de flujo laminar, transicional y turbulento. El exponente  $x$  depende del tipo de flujo, éste varía de acuerdo al mismo; para los del primer tipo, el valor de  $x$  varía de 0.59 a 0.80, mientras que para los de régimen turbulento, fluctúa entre 0.49 a 0.52. Por el valor de  $x$ , los emisores que se muestran en el Cuadro 3 son de flujo turbulento. Cuando el régimen es laminar como en microtubo, la Ecuación 1 se transforma en la Expresión 2 (Peña *et al.*, 1978).

$$q = K H^x T^y \quad 2$$

Donde: T representa a la temperatura del agua en (°C) y, el exponente y indica el efecto de la temperatura. En este caso, el valor de y fluctúa entre 0.10 a 0.30.

Actualmente los fabricantes de emisores prefieren diseñar aquellos de régimen tipo turbulento, por ser menos afectados en su gasto por cambios de temperatura. Los de flujo transicional no son recomendables porque en ocasiones se pueden comportar como de flujo turbulento y en otras como de flujo laminar. Esta inestabilidad resulta en diseños inapropiados debido a la incertidumbre en el uso de los parámetros de la ecuación de flujo.

**Cuadro 3. Parámetros K, x para diferente tipo de emisores (Adaptado de Peña, 1997).**

Emisor	Gasto (L h <sup>-1</sup> )	K	x
Gotero	2	0.5962	0.5189
Cintilla	1	0.2669	0.5461
Microaspersión	120-150	21.1661	0.5935
Aspersor	1200-1500	259.6217	0.5016

### Líneas regantes y distribuidores (unidad de riego)

En todo sistema de riego la uniformidad en la aplicación del agua depende de la variación existente en la carga de operación, la cual es debida a pérdidas por fricción y localizadas. La sumatoria de las pérdidas por fricción en cada tramo más las localizadas en cada conexión de los emisores corresponde a la pérdida de carga en una línea regante, mientras que en un distribuidor está constituida por las de fricción más las localizadas por conexión de las líneas regantes. Las ecuaciones que gobiernan tales pérdidas han sido citadas en numerosas obras de hidráulica, como las publicadas por Azevedo y Acosta (1978) y Russell (1979) en libros clásicos de riego como Hagan *et al.* (1967); Hidalgo (1971); Zimmermann (1970), Israelsen y Hansen (1979); entre otros. Dichas ecuaciones son:

Pérdidas por fricción (Manning):

$$H_f = \frac{10.29 C^2 S q^2}{D^{16/3}} \quad 3$$

Donde: H<sub>f</sub> es la pérdida de carga por fricción en (m), C el factor de fricción, S es el espaciamiento entre emisores y/o derivaciones de gasto en (m),  $\bar{q}$  el gasto medio del emisor (m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>), y D es el diámetro interior del tubo en (m).

Pérdidas Localizadas (Azevedo y Acosta, 1978; Sotelo, 1982):

$$H_L = \frac{K_g \bar{q}^2}{2 g A^2} \quad 4$$

Donde:  $HL$  son las pérdidas de presión localizada (m),  $kg$  es el coeficiente de pérdida de carga localizada por conexión del emisor u otro accesorio (valores para accesorios especiales de goteo, ver Ramírez y Escobar, 1978).  $\bar{q}$  representa el gasto medio del emisor ( $m^3 s^{-1}$ ),  $g$  significa la aceleración de la gravedad ( $m s^{-2}$ ) y  $A$  simboliza el área interior del tubo ( $m^2$ ).

Considerando que tanto una línea lateral como una distribuidora es un tramo de salidas múltiples, y al combinar las Ecuaciones 3 y 4 con la correspondiente de salidas múltiples se logra la Ecuación 5 (Ramírez *et al.*, 1978), la cual expresa el comportamiento hidráulico de tuberías para calcular la pérdida total de carga ( $Ht$ ).

$$Ht = \left[ \frac{10.29C^2 S}{D^{5.333}} + \frac{kg}{2gA^2} \right] q^2 \left( \frac{2N^3 + 3N^2 + N}{6} \right) \quad 5$$

Donde  $N$  es el número de salidas.

### Diseño hidráulico de sistemas de riego a presión

El diseño hidráulico de los sistemas de riego a presión es uno de los factores más importantes a considerar para asegurar el éxito de los mismos; así, en el pasado se realizaron una gran cantidad de investigaciones con el fin de lograr una mejor selección de las unidades de riego y una mejor uniformidad en la superficie regada.

La uniformidad a considerar en el diseño es aquella que refleja un 90 ó 95 por ciento (Ramírez *et al.*, 1978) entre el emisor más y el menos beneficiado en términos de volumen en una unidad de riego y/o línea regante, respectivamente. Este diferencial obedece a dos aspectos del diseño, el primero se refiere a la uniformidad la cual se asume que se debe a una variación en gasto en cada emisor y que depende solamente de la carga hidráulica y de la carga por posición. Es aceptable una variación máxima entre los gastos de 10 por ciento; el otro aspecto del diseño se refiere a la variación de la calidad del emisor. En este caso solamente hay que referirse al primer aspecto.

.Lo anterior deberá tener como base el comportamiento hidráulico de tuberías y accesorios, considerado en la Ecuación 5.

### Información previa.

Antes de iniciar el diseño de un sistema de riego es necesario contar con la siguiente información que será la base para asegurar el éxito del mismo: plano topográfico, características del suelo, fuente de abastecimiento, clima, cultivo e infraestructura disponible (CENAMAR, 1982).

### ***Plano topográfico***

Con el fin de iniciar un reconocimiento del terreno en donde se planea ubicar el sistema de riego es necesario obtener un plano topográfico del mismo en el cual las curvas de nivel se realicen a equidistancias de 50 cm, y además para la obtención de la escala más adecuada del plano topográfico es recomendable lo indicado en el Cuadro 4. También es necesario ubicar la localización de la fuente de abastecimiento del agua de riego.

**Cuadro 4. Escala recomendada del plano topográfico según la superficie a irrigar (CENAMAR, 1982).**

<b>Superficie (ha)</b>	<b>Escala</b>
hasta 25	1:500
26-50	1:1000
51-250	1:5000
251-500	1:8000

### ***Características del suelo***

Las características del suelo son determinantes en las decisiones de manejo que se le dará al cultivo tomando como punto de partida su comportamiento respecto a la aportación y disponibilidad tanto de agua como de nutrimentos y presencia de sales solubles. Dichas características se dividen en físicas y químicas. Las características físicas incluyen la textura, curva de capilaridad y velocidad de infiltración para calcular el área de influencia del gotero, capacidad de campo, punto de marchitez permanente y densidad aparente, con los cuales se calculará la capacidad de retención de humedad, así como la cantidad de agua por aplicar en cada evento de riego.

Por su parte, las características químicas incluyen al pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, relación de aniones y cationes, capacidad de intercambio catiónico y porcentaje de sodio intercambiable. Esta información es útil porque a partir de la misma, en conjunto con la del agua de riego y las demandas de nutrimentos del cultivo, se generan las recomendaciones del programa de ferti-irrigación.

### ***Características del agua de riego***

Dentro de las características del agua de riego a considerar están las físicas, las químicas y su disponibilidad. Entre las características físicas sobresale la cantidad de sólidos en suspensión debido a que de ello depende la selección del tipo de emisor y sistema de filtrado para evitar problemas de obstrucciones en la

tubería y emisores. Las características químicas abarcan el pH, conductividad eléctrica, relación de aniones y cationes y relación de absorción de sodio. De igual manera que en el suelo, esta información es la base para modificar la solución del suelo, sustento de operación de la ferti-irrigación. Finalmente, la disponibilidad de agua de riego es la variable más importante debido a que toda la inversión y su amortización dependerán de su disponibilidad en el tiempo.

### **Clima**

Las variables que caracterizan al clima respecto al diseño y operación de los sistemas de riego son: precipitación, temperaturas máxima y mínima, evaporación, velocidad del viento, humedad relativa y radiación solar. Los valores críticos dependen del sistema de riego que se esté proyectando; es fundamental la habilidad del proyectista para estimar unas a partir de otras. Dichas variables en forma diaria deberán de representar el promedio de un período prolongado de tiempo, se sugieren 20 años. Es importante conocer la velocidad y dirección del viento, sobre todo cuando se trata de diseñar riego por aspersión y microaspersión; de la misma manera, la humedad relativa es un factor asociado con la presencia de enfermedades de tipo fungoso que se puedan presentar durante el desarrollo del cultivo.

Aunque en la actualidad predominan los emisores de flujo turbulento, que no son afectados por la temperatura, es importante que al diseñar el sistema se considere esta variable climática ya que puede tener una influencia marcada en otros procesos como el metabolismo vegetal, solubilidad de iones y desarrollo de plagas, entre otros. Los datos de evaporación libre o demanda evaporativa y lluvia efectiva se utilizan normalmente para calcular los requerimientos de riego según la Ecuación 6.

$$V_r = \frac{[(C_c - Cha) Da Pr - Pe] (Ae)}{D_w} \quad 6$$

Donde:  $V_r$  es el volumen de riego ( $m^3$ ),  $C_c$  representa la capacidad de campo con base en peso seco (fracción),  $Cha$  significa el contenido de humedad actual con base en peso seco (fracción),  $Da$  es la densidad aparente ( $g\ cm^{-3}$ ),  $D_w$  simboliza la densidad del agua ( $g\ cm^{-3}$ ),  $Pr$  es la profundidad radicular esperada del cultivo (m),  $Pe$  representa la precipitación efectiva (m) y  $Ae$  el área equivalente ( $m^2$ ).

El área equivalente corresponde a la área de interés por regar; en el caso de hortalizas (goteo) es la que resulta al multiplicar la distancia entre líneas regante y distancia de emisores, mientras que para frutales (microaspersión) se considera según la siguiente clasificación para máxima superficie equivalente; a) árboles de área chica, como dátil, papayo y plátano, de 9 a 12  $m^2$ ; b) árboles de área mediana, como manzano, durazno, peral, chabacano y cítricos; de 20 a 30  $m^2$ ; c) árboles de superficie grande, en este grupo están considerados el nogal, olivo, aguacate, higo,

mango, tamarindo y similares, con rangos de 40 y 60 m<sup>2</sup>. La edad del árbol es un indicador del área equivalente como se muestra en el Cuadro 5 (Valenzuela, 1971).

**Cuadro 5. Porcentaje de área de equivalente según la edad y tipo de árbol.**

Año	Tipo de Área		
	Chica	Mediana	Grande
1°	33	33	25
2°	66	66	50
3°	100	66	50
4°	-	100	75
5°	-	-	75
6°	-	-	100

### **Cultivo**

Respecto al cultivo por considerar en el diseño, son dos las clases de información necesaria: datos generales y datos de diseño. Dentro de los primeros están la variedad, ciclo vegetativo, edad -si es que es perenne- y requerimientos nutricionales; mientras que dentro de la segunda, están la separación entre plantas, separación entre hileras -si es el caso- profundidad radicular y las constantes de cultivo para el cálculo de la evapotranspiración.

### **Infraestructura disponible**

En infraestructura se consideran las obras hidráulicas existentes como vías de acceso a la zona de riego, tipo de energía de que se dispone (para efectuar la selección de la motobomba) y la existencia en la zona de riego de algún motor o bomba que pudieran utilizarse para hacer funcionar el sistema (es necesario conocer las características del equipo existente para adaptar las necesidades de potencia que se requieren para la unidad de riego).

### **Procedimiento de diseño**

Para ejemplificar la aplicación de los principios básicos del diseño de sistemas de riego a presión se procederá de acuerdo a la metodología empleada en el Centro Nacional de Métodos Avanzados de Riego, ahora CENID-RASPA (CENAMAR, 1982), en un sistema de riego por goteo. El sistema se divide en tres partes: Unidades de riego, integradas por los emisores, líneas regantes y distribuidores; líneas de conducción y cabezal de control.

### 1. Diseño de la unidad de riego.

El primer paso es seleccionar el emisor o gotero de acuerdo con:

- a. Que sea hidráulicamente controlable.
- b. El gasto medio aplicado, que depende de la carga hidráulica.

Los goteros hidráulicamente controlables son los únicos que se deben someter a diseño puesto que con ellos se predice con gran exactitud lo que sucederá una vez instalado y operado el sistema. Como criterio de diseño en los sistemas de riego se acepta una diferencia máxima en gasto entre emisores de 10 por ciento debido a una variación de carga hidráulica de 20 por ciento; esta diferencia se representa de la siguiente forma:

$$\frac{q_f}{q_o} = 0.9$$

Donde:  $q_f/q_o$  es el cociente del gasto entre el último y primer emisor.

De acuerdo a la ecuación del gotero (Ecuación 1) y a la relación de gasto, se llega a lo siguiente:

$$\frac{q_f}{q_o} = \frac{KH_f^x}{KH_o^x} = 0.9$$

Sustituyendo y eliminando términos queda la siguiente ecuación:

$$H_f = (0.9)^{1/x} H_o \quad 7$$

Donde de manera análoga a los gastos,  $H_f$  representa la carga en el último gotero y  $H_o$  en el primero y la variación de carga referida entre el primero y último emisor se define por la relación:

$$\Delta H = H_o - H_f$$

Donde:  $\Delta H$  es la pérdida de carga permitida para obtener la diferencia de carga que se desea dentro de la unidad en (m), Al sustituir en la Ecuación 7 se obtiene:

$$\Delta H = (1 - 0.9^{1/x}) H_o \quad 8$$

Observando la Ecuación 8 se puede notar que se encuentra como incógnita  $H_o$  (presión de operación, es decir, la que se debe aplicar al inicio de la unidad para asegurar el gasto medio del emisor que se aplica dentro de ella).

La ecuación para calcular  $H_o$  es la siguiente (Ramírez *et al.*, 1978):

$$H_o = \left[ \frac{q}{k(0.9)^{1/2}} \right]^{1/x} \quad 9$$

$k$  y  $x$  se definieron en la Ecuación 1.

Específicamente para el caso de riego por goteo, un porcentaje de la pérdida de carga permisible  $\Delta H$  se utilizará para la selección del diámetro de la línea regante y el restante se asignará para la selección del diámetro del distribuidor. Las partes fundamentales de una unidad de riego por goteo son las líneas regantes o laterales y la tubería de distribución. Por lo tanto, un diseño apropiado es de gran importancia para el óptimo funcionamiento del sistema de riego.

### **a. Diseño de la línea regante**

Para diseñar la línea regante se deben considerar tanto las pérdidas de carga por fricción en la tubería como las pérdidas de carga localizadas por salidas o conexiones de los emisores.

Para calcular las pérdidas de carga por fricción en la tubería se utiliza la fórmula de Manning que se mostró en la Ecuación 3, pero también se pueden utilizar otras fórmulas como: Darcy-Weisbach o Hazen-Williams (De Saint, 1975; Pillsburg, 1968; Fry y Gray, 1971). Para las pérdidas de carga localizadas ( $H_L$ ) se utiliza la fórmula general en función del caudal que se muestra en la Ecuación 4; por lo tanto, la pérdida de carga total ( $Ht$ ) en la línea regante se obtiene con la Ecuación 5, la cual puede reducirse con fines más prácticos a la expresión 10 (Ramírez *et al.*, 1978):

$$Ht = \left[ \frac{10.29C^2S}{D^{16/3}} + \frac{kg}{2gA^2} \right] q^2 \sum_{i=1}^N i^2 \quad 10$$

Donde:  $N$  es el número total de emisores en la línea regante; la resolución de la sumatoria que aparece en la Ecuación 10 puede resolverse con la siguiente igualdad:

$$\sum_{i=1}^N i^2 = \frac{2N^3 + 3N^2 + N}{6}$$

El resultado de la sumatoria se sustituye en la Ecuación 10, por lo tanto, la  $Ht$  se igualaría con el porcentaje de la pérdida de carga correspondiente a la línea regante, que permitiría una variación establecida en el gasto dentro de la unidad, de tal manera que  $N$  quedaría como incógnita. Para solucionar la igualdad anterior se

puede utilizar el método de Newton-Ramphson (Jaquez *et al.*, 1978) que se aplica generalmente para encontrar las raíces de ecuaciones algebraicas; otra forma de solución es por "tanteos" al usar el coeficiente de salidas múltiples (CSM) dado por la siguiente ecuación:

$$CSM = \frac{\sum_{i=1}^N i^2}{N^3} \quad 11$$

Que al sustituirlo en la Ecuación 10 y despejando para  $N$  se convierte en la Ecuación 12 (Ramírez *et al.*, 1978):

$$N = \left[ \frac{Ht}{\left( \frac{10.29C^2S}{D^{16/3}} + \frac{kg}{2gA^2} \right) q^2 CSM} \right]^{1/3} \quad 12$$

Ya que el  $CSM$  depende de  $N$  para encontrar la solución, es necesario hacer iteraciones con ayuda del Cuadro 6.

**Cuadro 6. Coeficientes de salidas múltiples en tuberías para afectar el producto de pérdidas de carga total: Fuente (CENAMAR 1982).**

Darcy-Weisbach-Manning			
N	CSM	N	CSM
1	0.0000	18	0.3616
2	0.6250	19	0.3601
3	0.5185	20	0.3587
4	0.4687	25	0.3536
5	0.4400	30	0.3501
6	0.4213	35	0.3477
7	0.4081	40	0.3459
8	0.3984	45	0.3445
9	0.3909	50	0.3434
10	0.3850	55	0.3424
11	0.3801	60	0.3417
12	0.3761	65	0.3410
13	0.3727	70	0.3405
14	0.3699	75	0.3400
15	0.3674	80	0.3396
16	0.3652	90	0.3389
17	0.3633	100	0.3383

### **b. Diseño del Distribuidor**

El diseño del distribuidor es análogo al de las líneas regantes haciendo los ajustes apropiados; así pues, el número de líneas regantes que debe tener la tubería de distribución se calcula de manera similar que el número de emisores. Algunas definiciones de variables son:

$k_g$  = coeficiente de pérdida de carga localizada ocasionada por conexión de la tubería.

$q_r = N \bar{q}$  = si el distribuidor tiene líneas regante en un sólo lado.

$q_r = 2N \bar{q}$  = si el distribuidor tiene regantes a ambos lados.

Debe recordarse que para el propósito de salidas múltiples en unidades que riegan a dos lados, la  $N$  será solamente la mitad de las salidas físicas.

### **c. Tamaño y forma de la unidad de riego**

Un sistema de riego por goteo diseñado para un terreno con mínima pendiente la pérdida de carga ( $H_f$ ) que permite una cierta variación en gasto es la base para determinar el tamaño de la unidad. El tamaño dependerá también del tipo de distribuidor a utilizar, el gasto del gotero, espaciamiento entre plantas e hileras y de los diámetros del distribuidor y líneas regantes.

La forma de la unidad depende del porcentaje de la carga permisible a perder en la línea regante. Ahora bien, para cada valor de pérdida de carga existirá un valor del costo por punto de emisión, y que una vez que se definen gasto, densidades de población del cultivo y calidad del equipo, de ello dependen los diámetros seleccionados de distribuidor y regantes, así como del porcentaje de pérdida de carga en la línea regante.

Existen dos criterios para seleccionar tamaño y forma de la unidad de riego óptima, y son: El tamaño del área de riego y el número máximo de puntos de emisión. En la práctica se ha comprobado que cuando el número de puntos de emisión es muy alto, los costos fijos de la unidad (dispositivos de control de gasto y presión) se prorratean y se traducen en un costo global mínimo.

En los puntos por donde se alimentan las unidades de riego exigen dispositivos para control de presión y gasto, los cuales se incluyen en el diseño de la conducción debido a que la selección de estos afecta el costo del equipo así como la operación del sistema. La técnica de diseño debe considerar el método para el control de la presión y del gasto en las unidades de riego; con este fin se utilizan principalmente válvulas de compuerta. Otras alternativas son el uso de reguladores de presión basados en resortes (planet) o membrana (doll), (CENAMAR, 1982)

## 2. Diseño de la tubería de conducción

### a. Trazo de la línea de conducción

Estas tuberías son las de mayor diámetro en todo el sistema, por tanto se requiere que sus longitudes sean lo más cortas posible y que inmediatamente a la salida de la fuente de abastecimiento se derive el gasto total en un mayor número de ramificaciones de tal manera que se disminuyan al mínimo permisible los diámetros de tuberías. En los sistemas colectivos de riego por goteo se cumple con lo anteriormente expuesto y su metodología de diseño (Escobar *et al.*, 1978) es la que se presenta en este capítulo. Para diseñar la línea de conducción se siguen dos criterios: El diseño más corto o bien, el más económico.

**El diseño más corto:** Se supone que todas las tuberías tienen el mismo diámetro y se aplica la regla general de que el ángulo que forman dos tramos rectos sucesivos debe ser igual o mayor que 120 grados. Cuando los puntos de una red son varios, el trazado se complica. A continuación se expone el procedimiento ejemplificado para el caso de la unión de todos los puntos de una red, lo cual se ilustra en la Figura 2.

Se tiene un punto cualquiera A como origen, luego el punto más próximo a él es el B; se traza la recta A-B, se agrega el punto C, que es el siguiente más próximo uniendo B-C. Como el ángulo ABC es mayor que  $120^\circ$ , el trazado puede ser provisionalmente válido. El punto más próximo a los ya unidos es el D, se une con B y resulta que el ángulo ABD es menor que  $120^\circ$  y, por lo tanto, el trazo no es útil, siendo necesario aplicar un trazo en horquilla a los puntos A, B y D. Se genera un punto M asegurándose que el nuevo ángulo MBC sea mayor que  $120^\circ$ . El trazo de la tubería resultante es A M D M B C.

**El diseño más económico.** También se puede hacer un planteamiento analítico para buscar el trazo más económico. Esto se puede ilustrar con un ejemplo suponiendo únicamente los puntos A, B y D de la Figura 2.

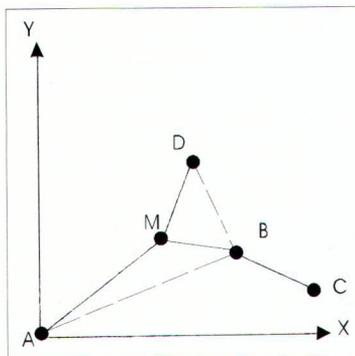


Figura 2. Diagrama de un sistema de conducción con un recorrido corto de la tubería.

Donde se conocen las coordenadas de los nudos, origen (1 o A) y destinos (2 o D y 3 o B), no así el nudo de bifurcación (M). Asimismo, se conocen los costos unitarios de cada sección de la red.

**Cuadro 7. Distancias en metros a los puntos de la red (ABD) de la Figura 2.**

Vértice	X (m)	Y (m)
1 o A	$X_1 = 0$	$Y_1 = 0$
Bifurcación (M)	$X = ?$	$Y = ?$
2 o D	$X_2 = 200$	$Y_2 = 200$
3 o B	$X_3 = 400$	$Y_3 = 80$

**Cuadro 8. Costo unitario de la tubería para la red (ABD) de la Figura 2.**

Sección	Costo \$/m
1 - M	120
M - 2	100
M - 3	80

En este caso, la función objetivo (costo) se dice ser un número y estará en función de las longitudes de cada sección y su costo ( $P$ ). A su vez, cada longitud de sección estará en función de las coordenadas, es decir:

$$d_{1-M} = \left[ (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 \right]^{0.5} \quad 13a$$

$$d_{M-2} = \left[ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 \right]^{0.5} \quad 13b$$

$$d_{M-3} = \left[ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 \right]^{0.5} \quad 13c$$

De esta manera la función objetivo será:

$$\{C\}_{\min} = d_{1-M} P_{1-M} + d_{M-2} P_{M-2} + d_{M-3} P_{M-3} \quad 14$$

Al procesar la función con una precisión del 0.01 se obtiene el siguiente resultado:

$$x = X_M = 190.1 \text{ m} , y = Y_M = 147.8 \text{ m}$$

Cuadro 9. Resultados de la red de tuberías ABD de la Figura 2.

Sección	Longitud (m)
1 – M	240.8
M – 2	53.15
M –3	220.56

**b. Ejemplo de diseño de un sistema de riego por goteo en una huerta de nogal Pecanero. Los porcentajes con asterisco están en base a peso de suelo seco.**

Datos	
1. Gasto disponible	9 Ls <sup>-1</sup>
2. Cultivo	Nogal
3. Profundidad a humedecer (Pr)	1.0 m
4. Plantación	Marco real
5. Separación entre plantas	12 m
6. Separación entre hileras	12 m
7. tipo de suelo	Migajon arcilloso
• Densidad aparente (Da)	1.32 g cm <sup>-3</sup>
• Capacidad de campo (Cc)	0.3148* (Decimal)
• Punto de marchitez permanente (Pmp)	0.1318* (Decimal)
• Capilaridad (Ac)	Ac = 0.9093T <sup>0.4599</sup>
8. Calidad del agua	C <sub>2</sub> S <sub>1</sub>
9. Evaporación media máxima diaria (Ev Máx. día <sup>-1</sup> )	11 mm
10. Coef. Experimental de Evapotranspiracion (K)	0.8
11. Tiempo disponible de operación (T <sub>o</sub> )	24 h
12. Ecuación del gotero	Q = 0.5962H <sup>0.5189</sup>
13. Tipo de gotero	Rex-122t
14. Gasto del gotero	2 L h <sup>-1</sup>
15. Eficiencia de riego	90 %
16. Velocidad de infiltración básica del suelo (Ib)	1.0 cm h <sup>-1</sup>

## Procedimiento de cálculo

### I. Cálculos agronómicos

#### 1.1. Volumen de suelo ( $V_s$ ).

Área de plantación (12 x 12) 144 m<sup>2</sup>

Área propuesta a humedecer ( $A_p$ ) 50 m<sup>2</sup> (criterio del área equivalente, valor medio entre 40 y 60 m<sup>2</sup>)

De donde:  $V_s = (A_p) (Pr) = (50 \text{ m}^2) (1.00 \text{ m}) = 50 \text{ m}^3$

#### 1.2. Volumen de agua ( $V_a$ ) necesaria para humedecer el volumen de suelo ( $V_s$ )

a capacidad de campo ( $C_c$ ) -no se considera precipitación efectiva como en la Ecuación 6-. El contenido de humedad del suelo es el del punto de marchitez permanente ( $P_{mp}$ ) con fines de diseño; en la práctica este valor corresponde al contenido de humedad presente antes de cada riego.

$$V_a = \frac{(C_c - P_{mp}) D_a V_s}{W_a} = \frac{(0.3144 - 0.1318) 1.32 * 50}{1} = 12.0516 \text{ m}^3$$

Donde:  $V_a$  en m<sup>3</sup>,  $C_c$  en decimal,  $P_{mp}$  en decimal,  $D_a$  en g cm<sup>-3</sup>,  $V_s$  en m<sup>3</sup> y  $W_a$  que es la densidad del agua es igual a 1 g cm<sup>-3</sup>.

#### 1.3. Demanda máxima de agua diaria por árbol ( $D_{max} \text{ día}^{-1}$ ).

$$D_{max} \text{ día}^{-1} = (k) (E_v) (A_p) = (0.8) \left( \frac{\frac{11 \text{ mm}}{1000 \text{ mm}}}{1 \text{ m}} \right) (50 \text{ m}^2)$$

$$D_{max} \text{ día}^{-1} = 0.440 \text{ m}^3$$

$$D_{max} \text{ día}^{-1} = 440 \text{ L}$$

#### 1.4. Caudal por árbol ( $Q_e$ = gasto por emisor). Se denomina emisor al conjunto de goteros.

$$Q_e = \frac{D_{max} \text{ día}^{-1}}{T_o} = \frac{440 \text{ L}}{24 \text{ h}} = 18.33 \text{ L h}^{-1}$$

#### 1.5. Tiempo ( $T$ ) en que se humedece a capacidad de campo ( $C_c$ ) el volumen del suelo ( $V_s$ ).

$$T = \frac{V_a}{Q_e} = \frac{(12.0156 \text{ m}^3) \left( \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \right)}{(18.33 \text{ L h}^{-1})} = 657.372 \text{ h}$$

$$T = (657.372 \text{ h}) \left( 60 \frac{\text{min}}{\text{h}} \right) = 39,442.32 \text{ min}$$

1.6. Ascenso capilar ( $A_c$  en cm) en función del tiempo ( $T$  en min).

$$A_c = 0.9093 T^{0.4599} = 0.9093 (39,442.32)^{0.4599} = 118.14 \text{ cm}$$

1.7. Considerando este avance como el radio del área de humedecimiento del gotero ( $A_g$ ), se tendrá:

$$A_g = \pi r^2 = 3.1416 \left( \frac{\frac{118.14 \text{ cm}}{100 \text{ cm}}}{1 \text{ m}} \right)^2 = 4.38 \text{ m}^2$$

1.8. Considerando un traslape de 10 por ciento entre el área de humedecimiento entre goteros ( $A_g$ ), el área efectiva por gotero ( $A_{eg}$ ) será:

$$A_{eg} = (A_g) (0.90) = (4.38 \text{ m}^2) (0.90) = 3.95 \text{ m}^2$$

1.9. Número de goteros ( $N_g$ ) necesarios para humedecer el área propuesta ( $A_p$ ) es:

$$N_g = \frac{A_p}{A_{eg}} = \frac{50 \text{ m}^2}{3.95 \text{ m}^2} = 12.66 \approx 13$$

1.10. Gasto necesario por gotero ( $q_g$ ).

$$q_g = \frac{Q_e}{N_g} = \frac{18.33 \text{ L h}^{-1}}{13} = 1.41 \text{ L h}^{-1} \approx 1.4 \text{ L h}^{-1}$$

1.11. Verificación del gasto del emisor (conjunto de goteros) para no encharcamiento del área equivalente a regar (Peña, 1981).

Se aceptan los emisores con un porcentaje de encharcamiento menor o igual a 10 por ciento.

Área irrigada por el emisor:  $50 \text{ m}^2$  ( $500,000 \text{ cm}^2$ )

Caudal del emisor:  $18.33 \text{ L h}^{-1}$  ( $18,330 \text{ cm}^3 \text{ h}^{-1}$ )

\* Área de infiltración por el emisor ( $A_{ei}$ ):

$$A_{ei} = \frac{Q_e}{I_b} + \frac{18,330 \text{ cm}^3 \text{ h}^{-1}}{1.0 \text{ cm h}^{-1}} = 18,330 \text{ cm}^2$$

\* Porcentaje de área encharcada (%  $A_{ech}$ ):

$$\% A_{ech} = \frac{A_{ei}}{A_p} \times 100 \% = \frac{18,330 \text{ cm}^2}{500,000 \text{ cm}^2} \times 100 \% = 3.66 \%$$

Considerando los anteriores resultados, se acepta el emisor propuesto como componente de diseño.

## II. Cálculo hidráulico

### 2.1. Presión de operación ( $H_o$ ) de la unidad de riego.

$$H_o = \left( \frac{q_g}{k_g (0.9)^{1/2}} \right)^{1/x} = \left( \frac{1.4}{0.5962 (0.9)^{1/2}} \right)^{1/0.5189} = 5.735 \text{ m}$$

Donde:  $H_o$  es la carga de operación en MCA,  $q_g$  es el gasto medio del emisor en  $L \text{ h}^{-1}$ ,  $k_g$  es el coeficiente de la ecuación del gotero (adimensional),  $x$  es el exponente de la ecuación del gotero (adimensional) y 0.9 el coeficiente de uniformidad de riego preestablecida (adimensional).

### 2.2. Pérdida de carga permisible $\Delta H$ en la unidad de riego.

$$\Delta H = \left[ 1 - 0.9^{1/x} \right] H_o = \left[ 1 - (0.9)^{1/0.5189} \right] 5.735 = 1.05 \text{ MCA}$$

Según experiencia del CENID-RASPA se recomienda dividir  $\Delta H$  entre un 25 por ciento para formar líneas regantes ( $\Delta H_{Lr}$ ) y un 75 por ciento para el distribuidor ( $\Delta H_D$ ).

Donde:  $\Delta H_{Lr}$  es la pérdida de carga permisible para línea regante, con el 25 por ciento;  $\Delta H_{Lr} = (0.25) 1.05 = 0.263 \text{ m}$ ;  $\Delta H_D$  es la pérdida de carga permisible para el distribuidor, y con 75 por ciento;  $\Delta H_D = (0.75) 1.05 = 0.787 \text{ m}$ .

### 2.3. Unidad de riego.

- Número de emisores ( $N_e$ ) por línea regante ( $L_r$ ).

Para resolver por aproximaciones sucesivas (tanteos) se hace uso de el CSM signado en el Cuadro 6 y aplicando la expresión 12.

$$N_e = \left[ \frac{\Delta H_{Lr}}{\left( \frac{10.29 C^2 S_e}{D^{16/3}} + \frac{K_g}{2gA^2} \right) (Q_e)^2 CSM} \right]^{1/3}$$

$$Ne = \left[ \frac{0.263}{\left( \frac{10.29 * 0.008^2 * 12}{0.0158^{16}} + \frac{0.5}{19.62 (0.785 * 0.0158^2)^2} \right) \left( \frac{18.2}{3.6EE^6} \right)^2} 0.3909 \right]^{1/3}$$

$$Ne = 8.9 = 9$$

Donde:  $\Delta H_{Lr}$  es la pérdida de carga permisible en línea regante en (MCA),  $C$  es el coeficiente de rugosidad de la tubería (adimensional),  $S_e$  es el espaciamiento entre goteros en m,  $D$  es el diámetro interior del tubo en m,  $k_g$  es el coeficiente por conexión del emisor para la pérdida localizada (adimensional),  $g$  es la aceleración de la gravedad ( $9.81 \text{ m s}^{-2}$ ),  $A$  es el área de flujo transversal en  $\text{m}^2$ ,  $Q_e$  es el caudal medio del gotero, que para este caso se determina por el número de goteros que constituyen al emisor que es  $(Ng) * (qg)$  en  $\text{L h}^{-1}$  y que debe procesarse en  $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ ; para su conversión se divide entre  $3.6 \times 10^6$ , y el  $CSM$  es el coeficiente de salidas múltiples (adimensional).

- Número de líneas regantes ( $N Lr$ ) en el distribuidor:

Esta ecuación se puede resolver por tanteos suponiendo que se conoce  $Ne$ , sustituyendo el  $CSM$  correspondiente, hasta que el resultado sea igual al  $Ne$  supuesto o algún método numérico más eficiente. Para el caso de distribuidores en esencia es la misma Ecuación 12 haciendo los cambios apropiados para el distribuidor.

$$N Lr = \left[ \frac{\Delta H_D}{\left[ \frac{10.29 C^2 S Lr}{D^{5.333}} + \frac{K_g}{2gA^2} \right] (Q Lr)^2 CSM} \right]^{1/3}$$

$$N Lr = \left[ \frac{\Delta H_D}{\left[ \frac{10.29 C^2 S Lr}{D^{5.333}} + \frac{K_g}{2gA^2} \right] (Q Lr)^2 CSM} \right]^{1/3}$$

$$N Lr = 16.4 = 16$$

Donde:  $\Delta H_D$  es la pérdida de carga permisible en el distribuidor en (MCA),  $C$  es el coeficiente de rugosidad de la tubería (adimensional),  $SLr$  es el espaciamiento entre líneas de riego en m,  $D$  el diámetro interior del tubo en m,  $k_g$  es el coeficiente por conexión de la tubería (te o silleta) para la pérdida localizada (adimensional),  $g$  es la aceleración de la gravedad ( $9.81 \text{ m s}^{-2}$ ),  $A$  es el área de flujo transversal en  $\text{m}^2$ ,  $QLr$  es el gasto por línea regante para la alimentación de los emisores (si en cada punto de conexión se alimentan dos líneas regantes, entonces  $QLr = (Qe) Ne (2) = 327.6 \text{ L h}^{-1}$ , el valor de  $3.6 \times 10^6$  es un factor de conversión de  $\text{L h}^{-1}$  a  $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ ), por último,  $CSM$  es el coeficiente de salidas múltiples (adimensional), cuyo valor corresponde a 14 salidas; para 10, 16 ó 100 salidas se obtendrá el mismo resultado.

### Superficie irrigada por unidad de riego (Sur)

Longitud de la tubería regante ( $Lr$ ):

$$(Ne) (Se) = (9) (12 \text{ m}) = 108 \text{ m}$$

Longitud de la tubería de distribución (LD):

$$(N Lr) (S Lr) = (16) (12 \text{ m}) = 192 \text{ m}$$

$$\text{Sur} = (2 \text{ LD}) (2 Lr) = (2 * 192 \text{ m}) (2 * 108 \text{ m}) = 82,944 \text{ m}^2 = 8 - 29 - 44 \text{ ha}$$

**Nota:** Ya que el distribuidor tiene regantes a ambos lados y que la línea de conducción alimenta dos distribuidores de iguales características, las longitudes de regante y distribuidor deben considerarse dobles para calcular la superficie de la unidad de riego.

- Número de árboles por unidad de riego:

Considerando la superficie de la unidad y el área de plantación del árbol.

$$\text{No. de árboles} = \frac{\text{Superficie de la unidad}}{\text{Área de plantación}} = \frac{82,944 \text{ m}^2}{144 \text{ m}^2} = 576$$

- Gasto por unidad de riego:

$$\text{Gasto por unidad} = \frac{(\text{Volumen por árbol})(\text{Num de árboles})}{T_o} =$$

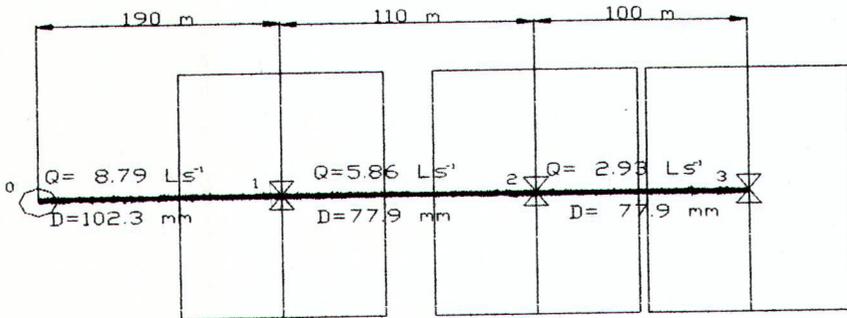
$$\frac{(440 \text{ L})(576 \text{ árboles})}{24 \text{ h}} = 10,560 \text{ L h}^{-1} = 2.93 \text{ L s}^{-1}$$

- Número de unidades de riego que se pueden regar simultáneamente con el gasto de la fuente de abastecimiento y en el tiempo de operación establecido.

$$\text{Num. de unidades} = \frac{Q_{\text{fuente}}}{Q_{\text{unidad}}} = \frac{9 \text{ L s}^{-1}}{2.93 \text{ L s}^{-1}} = 3 \text{ unidades}$$

**2.4. Cálculo de la tubería de conducción.**

Para el cálculo de pérdidas por fricción en cada tramo de conducción se utilizará la ecuación de Manning; los tramos están localizados en el croquis del sistema (Figura 3)..



**Figura 3. Croquis de instalación de la tubería de conducción de la superficie de riego proyectada.**

$$H_f = \frac{10.29 C^2 L Q^2}{D^{16/3}}$$

Donde:  $C$  es el coeficiente de rugosidad de la tubería de PVC (0.008 para todos los casos) y es adimensional,  $L$  es la longitud de la tubería (m),  $Q$  caudal que circula por la tubería ( $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) y  $D$  el diámetro de la tubería (m).

**Cuadro 10. Resultados de las pérdidas de carga hidráulica de la tubería de conducción 0-1-2-3 de la Figura 3.**

Tramo	$L$ (m)	$D$ (m)	$Q$ $\text{L s}^{-1}$	$Q$ $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$	$H_f$ (MCA)
0-1	190	0.1023	8.79	0.00879	1.85
1-2	110	0.0779	5.86	0.00586	0.49
2-3	100	0.0779	2.93	0.00293	0.47

- Pérdida de carga total en conducción:

$$H_{tc} = H_f \text{ 0-1} + H_f \text{ 1-2} + H_f \text{ 2-3}$$

$$H_{tc} = 2.81 \text{ m}$$

## 2.5. Selección del cabezal de control.

- Hidrociclón.

La selección de este dispositivo está basada en el gasto del sistema de riego por goteo, y el adecuado es: checando un catálogo, su marca y modelo.

Capacidad ( $L s^{-1}$ ):10; conexión: m (pulg.) 0.032m (1 1/4") x 0.032 m (1 1/4")

- Filtro de malla:

Este se selecciona de acuerdo al gasto del sistema; para este caso es de 9 L  $s^{-1}$ , y el más adecuado es también conforme a folleto del fabricante:

Marca: y Modelo; Capacidad ( $L s^{-1}$ ):11.10, conexión: m (pulg.): 0.0508 m (2") x 0.0508 m (2")

Con respecto al número de malla, éste se pedirá para eliminar las partículas que el hidrociclón no elimine, previo resultado del análisis de sólidos en suspensión del agua de riego.

- Selección del equipo de bombeo:

Para seleccionar adecuadamente la bomba centrífuga para el sistema de riego se recomienda hacer uso de las curvas características proporcionadas por los fabricantes para obtener la información técnica respecto a: eficiencia de bombeo, potencia requerida, tamaño, velocidad de giro, marca, modelo, así como gasto y carga de bombeo óptimos.

Otro criterio de selección de bomba es el de utilizar las fórmulas donde sólo se calcula la potencia que se requiere en la flecha de la bomba, así como la potencia del motor; este último se realiza a continuación:

Cálculo de la potencia que se requiere para la flecha de la bomba ( $POT_B$ ).

$$POT_B = \frac{Q_B * HT_B}{\eta_b * 76} = \frac{9 * 14.55}{0.566 * 76} = 3.04Hp$$

Donde:  $Q_B$  es el gasto de bombeo e igual al gasto disponible en  $L s^{-1}$ ,  $HT_B$  es la carga total dinámica o carga de bombeo y  $HT_B = H_o + HTC + HCC + T$  en (m), de la que  $H_o$  es la carga de operación (5.735 m),  $HTC$  son las pérdidas de carga total por conducción (2.81 m),  $HCC$  las pérdidas de carga del cabezal de control (6.0 m),  $T$  es el desnivel topográfico (0.0 m),  $\eta_b$  es la eficiencia de la bomba (adimensional), 76 es un factor de conversión a  $Hp$ .

El valor de la eficiencia de bombeo ( $\eta_b$ ) que se obtiene por medio de estimación, es aproximada a la eficiencia mecánica ( $\eta_m$ ), y que está en función del gasto bombeado [ $\eta_m = f(Q)$ ]; al respecto De Parres, 1977 presenta una gráfica

donde se obtienen valores medio, límites superior e inferior de las eficiencias mecánicas esperadas en función del caudal suministrado; dicho estudio comprende el muestreo de bombas de distintos fabricantes que se encuentran en el mercado. Por ajuste numérico del gráfico se proporciona a continuación la siguiente expresión para la obtención de cualquier dato:  $\eta_m = 1/(a+b/Q)$ , con  $R^2 = 0.9890$ , donde  $\eta_m \equiv \eta_b$  en por ciento (en la expresión de cálculo de la potencia de la bomba se procesa como un cociente (tanto por uno),  $a = 0.013274667$ ,  $b = 0.039597151$ , y el caudal ( $Q$ ) en,  $L s^{-1}$ , dicho ajuste con tales coeficientes se obtuvo para un rango de  $5-700 L s^{-1}$ , y para bombas centrífugas horizontales.

Cálculo de la potencia del motor de combustión interna.

$$Pot_m = \frac{POT_B}{\eta_{mot}} = \frac{3.04}{0.85} = 3.576 \cong 4 Hp$$

Donde:  $\eta_{mot}$  es la eficiencia del motor (adimensional, se menciona en por ciento, se procesa en tanto por uno)

**Nota:** Para motores de combustión interna nuevos generalmente los fabricantes recomiendan considerar un 85 por ciento de eficiencia del motor; para eléctricos lo proporciona el motor en su placa o utilizar el Cuadro 11.

- Selección del dosificador de fertilizantes:

En frutales, la capacidad del tanque dosificador (abierto o cerrado) se determina por el elemento de mayor consumo por el cultivo, que en este caso es el nitrógeno; de acuerdo al desarrollo del cultivo es necesario suministrar la cantidad acorde al diámetro del tronco, recomendándose  $64 g (N)$  por centímetro de diámetro del tronco; considerando este ejemplo, un árbol de ocho años de edad con un tronco aproximado de  $30 cm$  de diámetro, la necesidad de nitrógeno por árbol será de  $(64g (N cm^{-1}) (30 cm) = 1,920 g (N)$ .

Al utilizar como fuente de nitrógeno la urea (46 por ciento de  $N$ ) la cantidad de urea por árbol es de:

$$\frac{1,920 g (N) * 1,000 g urea}{460 g (N)} = 4,174 g urea$$

Cuadro 11. Eficiencia de motores eléctricos más comunes (en por ciento) 60 ciclos.

Caballos de Fuerza  HP	M o t o r			
	Monofásico		Trifásico	
	1750 rpm	3450 rpm	1750 rpm	3450 rpm
¼		63		
1/3		68		
½		69		
¾		71		
1	71	71	77	76
1 ½	71	71	80	77
2	71	73	80	79
3	75	75	80	80
5	75	78	82	81
7 ½			83	83
10			84	84
15			85	85
20			86	86
25			87	86
30			88	87
40			88	88
50-60			88	
75-100			89	
125-200			90	

Fuente: CENAMAR, 1982.

La recomendación es que por 130 g de agua se agreguen 100 g de urea (curvas de solubilidad CENAMAR, 1982) para obtener una solución al 100 por ciento disuelta; por lo tanto, el volumen (L) de agua por árbol es de:

$$\frac{4174 \text{ g urea} * 130 \text{ g agua}}{100 \text{ g urea}} = 5426.2 \text{ g agua}$$

$$\frac{5426.2 \text{ g agua} * 1 \text{ L agua}}{1000 \text{ g agua}} = 5.4262 \text{ L agua}$$

Para aplicar la dosis de fertilización por cada unidad de riego, la cantidad de agua con fertilizante (solución) que debe aplicarse durante el ciclo vegetativo es:

$$(5.426 \text{ L agua/árbol}) (576 \text{ árboles}) = 3,125.2 \text{ L}$$

A nivel comercial se tienen tanques dosificadores herméticos de: 50, 100 y 200 litros, por lo que es necesario elaborar un programa de fertilización que se ajuste a la disponibilidad de los dosificadores.

Para la Región Lagunera, el INIFAP recomienda fertilizar el nogal durante los meses de marzo y junio, por lo cual la cantidad total se puede dividir en cuatro aplicaciones por ciclo y considerando un tanque hermético de 220 litros; un programa tentativo de fertilización en donde el número de tanques por etapa o número de aplicaciones por etapa (NAE) sería el siguiente:

$$NAE = \frac{\text{Vol. de agua por ciclo}}{\text{Vol. del tanque dosificador}} = \frac{3,125 \text{ L}}{220 \text{ L}} = 3.5$$

La cantidad de fertilizante por aplicación se puede dividir en 3.5 tanques de 220 litros y distribuirse en cada aplicación de fertilización. La aplicación de fertilizantes por medio de los sistemas de riego presurizados ha cobrado tal importancia que los equipos y dispositivos son muy variados, requiriendo especificaciones de diseño adicionales a las que aquí se muestran. Se recomienda ampliamente abordar una publicación específicamente sobre aspectos químicos, agronómicos e hidráulicos del fertirriego.

Asimismo, se recomienda que el usuario interesado en instalar equipos de riego presurizados se asesore por personal calificado tanto en el diseño como en la operación y mantenimiento, de tal forma que los objetivos de esta tecnología se alcancen asegurando niveles de rentabilidad atractivos para el productor, y de sustentabilidad en el uso del recurso para la sociedad en general.

## Literatura Citada

- Azevedo, N. J. M de, y G. Acosta A. 1978 Manual de Hidráulica Trad. De la 6ª Ed. En Portugués por Ing. Guillermo Acosta Álvarez, editorial HARLA, México D. F.
- Burt, Ch. M. and W.S. Stuart. 1994 Emitter/Sprayer designs. Drip and microirrigation for trees, vines, and row crops. P 29-34 Designer Manager School of Irrigation, Irrigation training and Research Center (ITRC), California Polytechnic State University (CAL-POLY) San Luis Obispo, CA. USA.
- Centro Nacional de Métodos Avanzados de Riego (CENAMAR). 1982. Memorias VII curso de riego por goteo, SARH-DGUR, Gómez Palacio, Dgo. Junio 1982.
- Christiansen, J. R. 1942. Irrigation by sprinkling. California Agricultural Exp. Station Bulletin No. 570 USA.
- De Parres J. L. 1977. Maquinas Hidráulicas Cuarta Edición, Tercera reimpresión Ed. Lituarte S. de R. L. F. C. de Cuernavaca 683, México, D. F.
- Escobar A., M. A., E. Peña P. y C. E. Ramírez C. 1978. Método para diseño óptimo, económico e hidráulico en sistemas de riego por goteo II Seminario Nacional sobre riego por goteo Memorias tomo 1 Región Lagunera Coah. y Dgo. México p 109-133.
- Fry, A.W. and S. Gray. 1971. Sprinkler Irrigation handbook. Rain Bird Sprinkler Manufacturing, Co. Glendora, California, USA.
- Gómez P., P. 1974. La Técnica y la Tecnología del Riego por Aspersión. Servicio de publicaciones del Ministerio de Agricultura. Madrid, España.
- 1975. Riego a Presión, aspersión y goteo ED. Aedes, Barcelona, España.
- De Saint Foulo, J. 1975. El Riego por Aspersión, Editores Técnicos Asociados, S. A. Barcelona, España.
- Hargreaves, G. H. and Samani, Z. A. (1985) Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. Applied Engineering in Agriculture. 1(2) 96-99.
- Hagan., R. N., S. E., Haise. and T. W. Edminister. 1967. Irrigation of Agricultural Land. American Society of Agronomy No. 11. USA.
- Hidalgo G., A. 1971. Métodos Modernos de Riego de Superficie. Aguilar, S.A. Ediciones Madrid, España.
- Israelsen, O. W. and V. E. Hansen 1979. Principios y aplicación del riego. Edit. Rovérté Madrid, España. 2a. Edición.
- Jáquez A., D., M. A. Escobar A., E. Peña P. y C. E. Ramírez C. 1978. La computación electrónica en el diseño de unidades de riego por goteo. II Seminario Nacional sobre riego por goteo Memorias Tomo 1, Región Lagunera Coah. y Dgo. México. p. 77-107.

- Keller, J. and D. Karmeli, 1974. Trickle Irrigation Design. Edited and published by Rain Bird sprinkler corporation, Glendora, California 91740 USA. p. 20-25.
- Peña P., E., M. E. Escobar A. y C. E. Ramírez C. 1978. Análisis y evaluación del funcionamiento hidráulico de goteros, II Seminario Nacional Sobre riego por goteo, Memorias Tomo 1, p 9-41 Región Lagunera Coah. y Dgo. México.
- Peña P., E. 1981. Relación entre las características del suelo y el consumo de agua por los cultivos, con el diseño hidráulico de los sistemas de riego por goteo. Memorias del IV Seminario Latinoamericano «riego por goteo y riego localizado» en Barquisimeto Venezuela Junio 1981 P 3.2.120–3.2.144.
- 1997. Tecnificación del riego presurizado. Manual para diseño de zonas de riego pequeñas. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), Comisión Nacional del Agua (CNA), p. 91-139.
- Pillsburg, A. F. 1968. El Empleo del Riego por Aspersión, FAO. Cuadernos de Fomento Agropecuario No. 68 Roma, Italia.
- Russell, E. G. 1979. Hidráulica. 1ª Edición CECSA México, D. F.
- Ramírez C., C. E. y M. E. Escobar A. 1978. Funcionamiento hidráulico de accesorios y dispositivos de sistemas de riego por goteo, II Seminario Nacional sobre Riego por Goteo. Memorias Tomo 1, Región Lagunera Coah. y Dgo. México. p 43-54.
- Ramírez C., C. E., M. A. Escobar A. y L. Moreno D. 1978. Funcionamiento hidráulico de líneas regantes, II Seminario Nacional sobre Riego por Goteo. Memorias Tomo 1 Región Lagunera Coah. y Dgo. México. p. 55-75.
- Sánchez C., I. 2004a. Incremento en la eficiencia global en los distritos de riego del norte del país. Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Proyecto Nacional SAGARPA-CONACYT.
- 2004b. Ingeniería del aprovechamiento del agua. Proyecto Nacional. Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Sotelo A., G. 1982. Hidráulica General. Volumen 1. Fundamentos Ed. Limusa. México D. F.
- Valenzuela, R. T. 1971. Principios Básicos del riego por goteo Memorándum Técnico No. 256 SARH.
- World Water Resources Insitute. 1993. World Water Resources 1992-1993. New York Oxford University Press.
- Zimmermann, J. D. 1970. El Riego Ed. CECSA., S. A. México.

**Comité Editorial del CENID-RASPA**

Presidente: Dr. Ignacio Sánchez Cohen

Secretario: Ing. Raquel Anguiano Gallegos

Editor Técnico: Dr. Rodolfo Jasso Ibarra

Esta publicación se terminó de imprimir en el mes de  
Diciembre del 2004 en los talleres del Grupo Colorama  
de Torreón, Coahuila.

Su tiraje consta de 500 ejemplares

$$q = k H^x$$

$$H_o = \left[ \frac{q}{k} (0.9)^{1/2} \right]^{1/x}$$

$$\Delta H = (1 - 0.9^{1/x}) H_o$$

$$H_t = \left( \frac{10.29 C^2 S}{D^{16/3}} + \frac{K_g}{2gA^2} \right) \bar{q}^2 N^3 \text{ CSM}$$

$$\text{CSM} = \frac{\sum_{i=1}^N i^2}{N^3}$$

$$N = \left( \frac{H_t}{\left( \frac{10.29 C^2 S}{D^{16/3}} + \frac{K_g}{2gA^2} \right) \bar{q}^2 \text{ CSM}} \right)^{1/3}$$

### CENID-RASPA

Km 6.5 margen derecha canal Sacramento

Gómez Palacio. Durango. MÉXICO.

Apdo. Postal 41, Cd. Lerdo, Dgo.

Tels. y Fax: 01 (871) 719-10-76, 719-10-77 y 719-11-34

e-mail: roman.abel@inifap.gob.mx