INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES FORESTALES, AGRÍCOLAS Y PECUARIAS
CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN DISCIPLINARIA EN RELACIÓN AGUA-SUELO-PLANTA-ATMÓSFERA

CENID-RASPA

RIEGO POR GOTEO Y SU AUTOMATIZACIÓN

MC. ABEL ROMÁN LÓPEZ
DR. MARCO ANTONIO INZUNZA IBARRA
DR. ERNESTO A. CATALÁN VALENCIA
DR. IGNACIO SÁNCHEZ COHEN
DRA. MA. MAGDALENA VILLA CASTORENA
MC. FRANCISCO CONTRERAS DE LA REE

ISBN: 978-607-425-071-8

Libro Técnico N° 3

Gómez Palacio, Durango CENID-RASPA Noviembre del 2008

DIRECTORIO INSTITUCIONAL

SECRETARÍA DE AGRICULTURA, GANADERÍA, DESARROLLO RURAL, PESCA Y ALIMENTACIÓN

Ing. Alberto Cárdenas Jiménez
Secretario
Ing. Francisco López Tostado
Subsecretario de Agricultura
Ing. Antonio Ruiz García
Subsecretario de Desarrollo Rural
Lic. Jeffrey Max Jones Jones
Subsecretario de Fomento a los Agronegocios

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES FORESTALES, AGRÍCOLAS Y PECUARIAS

Dr. Pedro Brajcich Gallegos
Director General
Dr. Enrique Astengo López
Coordinador de Planeación y Desarrollo
Dr. Salvador Fernández Rivera
Coordinador de Investigación, Innovación y Vinculación
Lic. Marcial A. García Morteo
Coordinador de Administración y Sistemas

CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN DISCIPLINARIA EN RELACIÓN AGUA-SUELO-PLANTA-ATMÓSFERA

Dr. José Antonio Cueto Wong
Director

Riego por Goteo y su Automatización

MC. ABEL ROMAN LÓPEZ[1]
DR. MARCO ANTONIO INZUNZA IBARRA[1]
DR. ERNESTO ALONSO CATALAN VALENCIA[1]
DR. IGNACIO SÁNCHEZ COHEN[1]
DRA. MA. MAGDALENA VILLA CASTORENA[1]
MC. FRANCISCO CONTRERAS DE LA REE[2]

[1]Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmosfera. Km. 6.5 Margen Derecha Canal Sacramento, Gómez Palacio, Dgo. C. P. 35140.

[2]Campo Experimental Saltillo. Boulevard Vito Alessio Robles #2565, Col. Nazario Ortiz Garza. C. P. 25100, Saltillo, Coahuila.

CENID-RASPA
Noviembre 2008

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Av. Progreso No. 5, Barrio de Santa Catarina.
Delegación Coyoacán, C. P. 04010 México, D. F.
Teléfono (55)38718700

Primera Edición 2008.

No esta permitida la reproducción total o parcial de esta publicación, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico, fotocopia, por registro u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito a la Institución.

ISBN: 978-607-425-071-8

PRÓLOGO

La presente Publicación forma parte de la metodología sobre diseño, operación, conservación y evaluación de los sistemas de riego por goteo que desde 1982 se inició en el Centro Nacional de Métodos Avanzados de Riego (CENAMAR-SARH) actualmente CENID-RASPA-INIFAP. Como era de esperarse, después de mas de dos décadas y media de implementados estos sistemas de riego en el país, el diseño, operación y evaluación han evolucionado, por tal razón se han agregado actualizaciones como lo correspondiente a la automatización, de estos sistemas de riego localizado. Esto de acuerdo al criterio del personal de investigación del CENID-RASPA que ha realizado estudios con tecnología tradicional hasta la moderna como la automatización y que esta de acuerdo a la evolución de los sistemas de riego localizado a nivel mundial. En la evaluación de estos sistemas se contemplan los indicadores de eficiencia en el uso y manejo del agua para los sistemas de riego, y así en forma similar se han actualizado cada uno de los capítulos de este documento.

Con base en lo anterior, se considera importante dar a conocer este documento especializado en el riego por goteo, con el objetivo de proporcionar la experiencia tecnológica adquirida en el Centro acerca del conocimiento del funcionamiento hidráulico y del diseño de los componentes del sistema de riego por goteo que conduzcan a una adecuada selección para la operación eficaz de los mismos, conforme a resultados de investigación que en ingeniería de riego presurizado se tiene en el CENID –RASPA con estos sistemas de riego para que estén más fácilmente disponibles a investigadores y técnicos del INIFAP y otras instituciones comprometidas con el buen uso del agua de riego.

Dr. José Antonio Cueto Wong
Director del CENID-RASPA

CONTENIDO

	Página
Introducción	1
Generalidades del riego por goteo	3
Componentes de un sistema de riego por goteo	3
Ventajas del riego por goteo	25
Desventajas del riego por goteo	26
Automatización de los sistemas de riego localizado	28
Funcionamiento hidráulico de los componentes de un sistema de riego por goteo	39
Funcionamiento hidráulico de goteros y emisores	39
Funcionamiento hidráuluco de lineas regantes y distribuidores	44
Funcionamiento hidraulico de accesorios y dispositivos	47
Funcionamiento hidraulico del cabezal de control	49
Diseño de los sistemas de riego por goteo	55
Introduccion al diseño	55
Prerrequisitos de diseño	59
Diseño hidráulico del sistema de riego por goteo	63
Ejemplo del diseño de un sistema de riego por goteo	76
Operación de sistemas de riego por goteo	92
Programación y requerimiento de riego	92
Operación del cabezal de control	97
Aplicación de fertilizantes en los sitemas de riego por goteo	102
Previsión y combate de problemas de obstrucción de goteros	114

Aplicación de fertilizantes tratados en los sistemas de riego por goteo 115
Evaluación de sistemas de riego por goteo 122
Evaluación económica de proyectos de riego 122
Evaluación de eficiencias en sistemas de riego por goteo 134
Evaluación agronómicas de sistemas de riego por goteo 143
Bibliografía 145

ÍNDICE DE FIGURAS

		Página
1.-	Componentes de un sistema de riego por goteo	4
2.-	Componentes de la unidad de riego	5
3.-	Distribuidores que riegan a un solo lado	6
4.-	Distribuidores que riegan a ambos lados	6
5.-	Distribuidores que riegan a ambos lados y se alimentan por el centro	7
6.-	Gotero de flujo turbulento. Los dos primeros goteros son de tipo postón insertados en línea, los dos siguientes se incluyen dentro de la manguera.	9
7.-	Goteros de flujo turbulento de conexion sobre la línea	9
8.-	Cinta de goteo con formaciones (imagen centro) para inducir el flujo turbulento	10
9.-	Red de la tuberia de conducción	11
10.-	Esquema de los componentes de un cabezal de control típico en un sistema de riego por goteo	12
11.-	Dosificador de tapa hermética	13
12.-	Dosificador de tanque abierto	13
13.-	Venturi inyector de fertilizantes con válvula reguladora de presión (Izq.) y en línea mediante "By-Pass"	14
14.-	Bomba inyectora de fertilizantes con bomba centrífuga y venturi	15
15.-	Bomba de inyección de pistones, para la incorporación de fertilizantes en riegos a presión	15

16.- Inyectores de fertilizantes automatizados 16
17.- Filtro hidrociclón o desarenador comúnmente utilizado en agua con alto contenido de arenas disueltas 18
18.- Filtro de malla conectados en serie 19
19.- Representación esquemática y fotográfica del filtro de arena 20
20.- Manómetro tipo Bourdon 23
21.- Medidor de gasto tipo rotámetro 23
22.- Reguladores de presión 24
23.- Tipos de válvulas más comunes que se utilizan en riego por goteo; globo (izq.) y de compuerta (der.) 24
24.- Organigrama descriptivo de los tipos de automatización en sistemas de riego presurizado 28
25.- Instalación típica de tuberías a un controlador hidráulico 31
26.- Operación de una válvula de control hidráulico 31
27.- Instalación típica de tuberías y cables a un controlador eléctrico 33
28.- Representación esquemática de un sistema de riego por goteo automatizado 34
29.- Controlador eléctrico-electrónico de botones 34
30.- Controlador eléctrico-electrónico digital 35
31.- Satélites de campo (controladores eléctricos-electrónicos) 36
32.- Central computarizada para el control de satélites de campo 36
33.- Controlador X-10 para computadora IBM o PC compatible sustituto de un controlador eléctrico-electrónico 38
34.- Estudio del microtubo (1mm φ) Exp.= Espagueti o microtubo 41

35.- Estudio de un gotero de geometría rígida y de flujo laminar 42
36.- Estudio de un gotero de geometría rígida y de flujo turbulento 42
37.- Estudio de una cinta de goteo 43
38.- Plano piezométrico de un cabezal de control, donde H es la carga hidráulica, F es el filtro de malla y antes de él, el filtro hidrociclón 50
39.- Diagrama de un sistema de conducción con un recorrido corto de la tubería 73
40.- Croquis de instalación de la tuberíade conducción de la superficie de riego proyectada 87
41.- Válvula de alivio de presión 102
42.- Curvas entre la relación de la concentración en el tanque y la concentración inicial (Ct Co-1) y el tiempo (t) para distintos valores de k (g v-1) 108
43.- Aplicación de fertirrigación de acuerdo ala forma de la curva logística obtenida 113
44.- Curvas de solubilidad de fertilizantes agrícolas 118
45.- Diagrama de flujo de dinero 125
46.- Diagrama de flujo que muestra las diferentes variables antes mencionadas 127
47.- Diagrama de flujo de dinero de un proyecto de riego por goteo 130
48.- Conceptualización de la interpolación entre los valores (VP, i) 132
49.- Índices de eficiencia de aplicación y requerimiento 140

relacionados con la uniformidad de riego
50.- Sistema de riego por goteo y su unidad de riego 142

ÍNDICE DE CUADROS

		Página
1.-	Mallas para filtros y su selección	19
2.-	Tipo de filtrado de agua para sistemas de riego localizado con base en la fuente de agua	22
3.-	Ejemplo de constantes y parámetros de regresión de un estudio sobre goteros	43
4.-	Coeficiente de rugosidad de Manning (C)para tuberias lisas	46
5.-	Coeficiente de pérdidas de carga localizada para distintas conexiones de los goteros	48
6.-	Valores del coeficiente de carga localizadas (kd) de las conexiones te o silletas más comunes	49
7.-	Eficiencia de motores eléctricos (%) más comúnes de 60 ciclos	55
8.-	Porcentajes aplicados a las áreas de influencia equivalentes según el desarrollo vegetativo de los árboles	58
9.-	Escala sugerida para el diseño conforme a la superficie de riego por goteo	59
10.-	Coeficientes de salidas múltiples en tuberías que afecta el producto de pérdida de carga total	67
11.-	Distancias en metros a los puntos de la red (ABD) de la Figura 39	74
12.-	Costo unitario de la tubería para la red (ABD) de la figura 39	74
13.-	Resultados de la red de tuberias ABD	75

14.- Datos requeridos para realizar el ejemplo del diseño 76
15.- Datos del ejemplo numérico 82
16.- Interaciones Newton-Ramphson para encontrar la solución 84
17.- Pérdidas de carga hidráulica en tuberías de conducción del ejemplo de diseño en nogal 87
18.- Flujo de la solución a través del tanque (L h-1) en función de las diferentes pérdidas de presión 98
19.- Solubilidad y composición de los fertilizantes más utilizados 104
20.- Tiempo por sitio de aplicación del fertilizante 107
21.- Datos obtenidos de Burgueño *et al.* (1994), para el cultivo de tomate 110
22.- Acumulación de datos anteriores y su promedio 100
23.- Datos promedio expresados (adimensional) 101
24.- Parámetros del modelo logístico 101
25.- Cantidades de fertilizante en forma relativa y acumulado a aplicar 102
26.- Programación de las dosis de fertilizante adimensionalmente en función del tiempo 103
27.- Programación final de las dosis de fertilizantes 104
28.- Solubilidad de fertilizantes nitrogenados comerciales 109
29.- Clasificación de emisores de acuerdo al coeficiente de variación (CV) 121
30.- Rangos recomendados de la uniformidad de emisión (UR) para el diseño de riego por goteo, considerando las características topográficas del terreno 122

31.- Eficiencia de riego real o global que se pueden alcanzar con los diferentes sistemas de riego presurizados 123

32.- Valores de aforo (Q, L h-1) de 50 emisores en un sistema de riego por cintilla 127

INTRODUCCION

Indudablemente el uso de los sistemas de riego por goteo ha demostrado durante más de dos décadas la obtención de altos rendimientos de los cultivos utilizando menor volumen de agua principalmente en hortalizas y frutales, logrando altas eficiencias de riego (mayores al 90 por ciento) al ser comparado con los métodos de riego por gravedad. Sin embargo se presentan problemas debido a los altos costos de adquisición, operación y taponamiento de goteros lo que ha reducido su uso. En países desarrollados como Estados Unidos se tuvo un crecimiento sin precedentes de 1970 a 1985, de 50 mil a 300 mil ha. Con una tendencia similar en México, se presentó un incremento de las superficies irrigadas con este sistema de riego localizado de 500 ha en el año de 1970 a 15 mil ha para 1981.

Numerosos estudios de factibilidad económica concluyeron la viabilidad total de implementar dichos sistemas de riego en la agricultura. Además, con la gran aceptación que tuvieron los sistemas de riego por microaspersion en jardines y campos deportivos y con su rápida automatización influyó que paulatinamente se iniciara la automatización de los sistemas de riego por goteo en la investigación agrícola y en la agricultura comercial.

Este sistema de riego formado por goteros, tuberías de plástico, equipo de bombeo y dispositivos para filtrado y enriquecimiento de nutrimentos del agua utilizada, facilita las operaciones de riego, fertilización y labores culturales; todo esto se logra con base en un programa intensivo de mantenimiento para la conservación del equipo.

Con respecto a la automatización del riego por goteo implícito en un sistema experto que tome decisiones en el cómo, cuándo y cuánto regar sin la intervención del usuario, es posible mediante controladores de riego accionados por computadora y estaciones climatológicas automatizadas. Esta publicación realizada por investigadores del CENID-RASPA-INIFAP, tiene la finalidad de que sirva como guía en el diseño, automatización, operación, conservación y evaluación de los sistemas de riego por goteo a los

productores agrícolas, a investigadores y a técnicos especialistas en el buen uso y manejo del agua.

GENERALIDADES DEL RIEGO POR GOTEO

El riego por goteo es el sistema de regadío donde el agua se lleva a través de tuberías al punto donde se infiltra en el suelo, específicamente en las raíces de las plantas; el gasto se controla con pequeños dispositivos rígidos llamados "goteros" que lo depositan sobre el terreno "gota a gota". Al comparar los métodos de riego se observa que la diferencia entre ellos es la facilidad para regar, fertilizar y realizar las labores de cultivo de acuerdo a las condiciones del suelo, cultivo, clima y topografía. Por otra parte, entre mayor es el área por regar, mayor es la dificultad para aplicar eficientemente el agua y los fertilizantes. Al usar diferentes métodos de riego cambia el costo total de producción; así pues, el riego por goteo permite mayor economía por las facilidades anteriormente mencionadas, principalmente en cultivos perennes como: durazno, guayaba, vid, nogal, cítricos y otros. Durante todo el ciclo vegetativo de un cultivo utilizando riego por goteo es posible suministrar el agua necesaria para su desarrollo directamente en el lugar donde se desarrolla la planta, de manera que al distribuirse en el suelo permanezca en condiciones óptimas de humedad (cercano a capacidad de campo) en cada etapa de desarrollo de los cultivos.

En general, y con el propósito de hacer un uso eficiente del riego por goteo, éste debe instalarse en regiones que presenten las siguientes condiciones:

Escasez de agua (zonas áridas y semiáridas), suelos con topografía accidentada y/o arenosa, y suelos y/o aguas con problemas de salinidad.

Componentes de un sistema de riego por goteo

Fundamentales: Unidades de riego, tuberías de conducción y cabezal de control.

Auxiliares: Dispositivos de control

Los componentes básicos de un sistema de riego localizado son los siguientes (Figura 1):

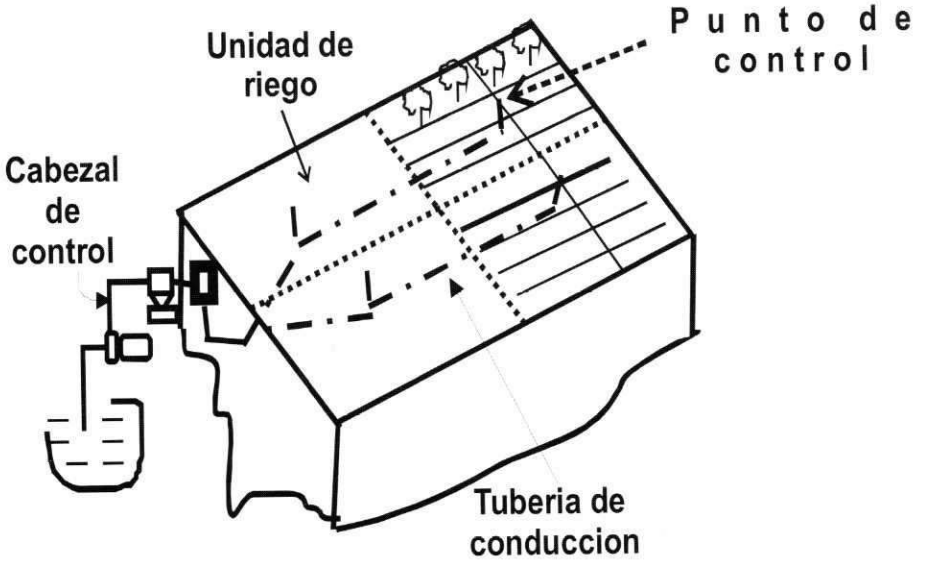


Figura 1. Componentes de un sistema de riego por goteo

Unidades de riego

Cuando se tienen áreas de riego de grandes dimensiones donde se establecerá este sistema de riego, se divide en áreas más pequeñas conocidas como unidades de riego. Sus dimensiones deben ser de tal tamaño que puedan controlarse con un dispositivo (válvulas, planet, doll, etc.); es decir, es aquella que permita desde un punto base (dispositivo) controlar una cantidad máxima de emisores o goteros.

Todas las partes de una unidad de riego se operan desde un punto el cual se llama "punto de control", y es donde se maneja la presión y el gasto de la unidad.

La unidad de riego (Figura 2) está formada por:

a. Un distribuidor
b. Líneas regantes
c. Emisores
d. Conexiones
e. Tapones

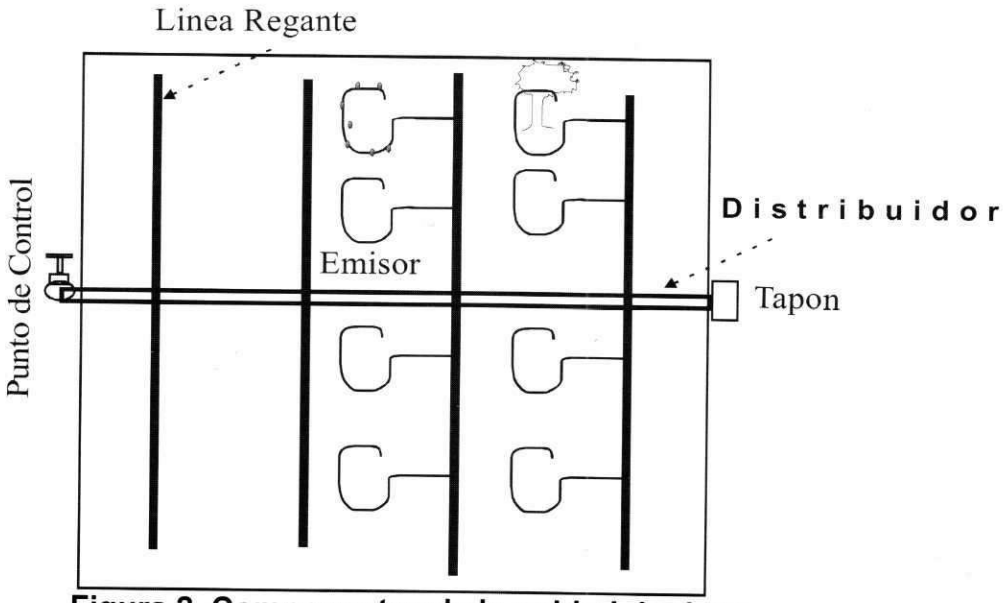


Figura 2. Componentes de la unidad de riego

Distribuidor

El distribuidor es la tubería que alimenta a las líneas regantes; va conectada con la línea principal o de conducción, y en esta conexión o "punto de control" es donde se instala el dispositivo (válvula, planet, doll) para regular el gasto (Figura 2). En el mercado existen tuberías de materiales

plásticos como polietileno y PVC, deben fabricarse con materiales que no sean afectados por substancias corrosivas como ácidos y fertilizantes, que en riego por goteo son comúnmente aplicadas al sistema junto con el agua de riego.

Para la conexión de las líneas regantes en el distribuidor existen varios diseños que conforman unidades de riego como las que se muestran en las Figuras 3, 4 y 5.

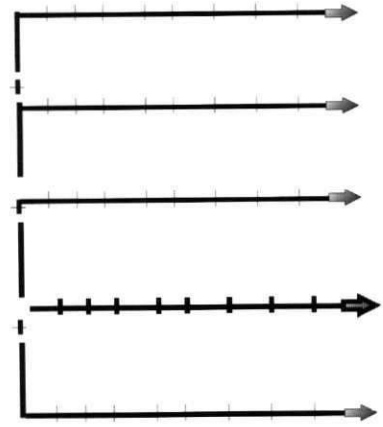


Figura 3. Distribuidores que riegan a un solo lado

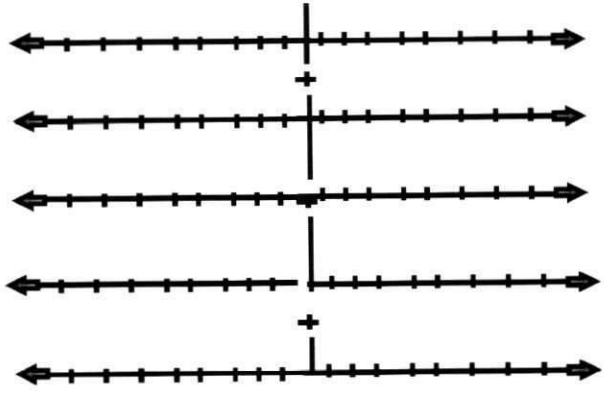


Figura 4. Distribuidores que riegan a ambos lados

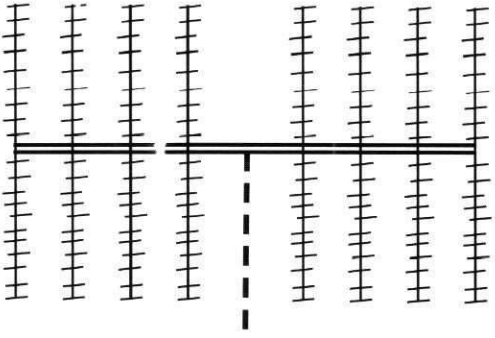


Figura 5. Distribuidores que riegan ambos lados y se alimentan por el centro

Líneas Regantes

Es la tubería que alimenta a los emisores (frutales), goteros conectados al tubo o goteros y/o cintas de goteo (hortalizas). Generalmente se fabrican de diámetros interiores de 10 y 16 mm, deben ser flexibles de polietileno negro de alta densidad que resista una presión aproximada de l5 m de carga de columna de agua (147.1 KPa) y además el efecto del medio ambiente (variación topográfica).

Emisores

El emisor es el elemento primordial en la dosificación del agua a las plantas. El agua fluye a través de los emisores y descargan gotas al suelo en forma constante, con una intensidad baja a presión atmosférica. En frutales, un emisor es el conjunto de goteros, tubería, tapón y/o conexiones que riegan un árbol (Figura 2). Para el caso de hortalizas, un emisor es el gotero que se asigna a varias plantas, siendo el gotero la parte principal de la unidad de riego.

Los emisores como disipadores de energía de la presión del agua

La disipación de energía se basa en la fricción del fluido al pasar a través de un conducto cerrado y en las pérdidas de energía localizadas

debidas a accidentes en la trayectoria del flujo o una combinación de ambas. Las variaciones en el tipo de goteros se deben a los materiales de construcción, tipo de conexión en la línea regante, número de salidas, si son sellados o desarmables y a su geometría rígida o flexible. Así, actualmente existe en el mercado una gran variedad de tipos, formas y tamaños de goteros que, en general desde el punto de vista hidráulico, pueden agruparse con respecto al régimen de flujo como de goteros de flujo laminar, transicional y turbulento.

Goteros de flujo laminar

En este grupo están comprendidos los emisores cuyo cuerpo principal son tubos de polietileno negro de alta densidad, de diámetro pequeño para paso del agua entre 1 y 1.5 mm conocidos como 'microtubos' y los goteros de geometría rígida y trayectoria larga formando una especie de serpentín; con un número de Reynolds ($Re \leq 2000$), este tipo de goteros son poco utilizados.

Goteros de flujo transicional

En este grupo se encuentran los goteros de trayectoria larga con vueltas en retorno de geometría rígida y con conductos de forma tubular o de membrana con orificios. Su número de Reynolds se encuentra en el rango de $2000 \leq Re \leq 4000$ y al igual que los laminar también son poco utilizados.

Goteros de flujo turbulento

Estos goteros se caracterizan por su pérdida de presión la cual se basa en cambios de dirección y obstáculos en su trayectoria, son los realmente utilizados y disponibles en el mercado. Entre este tipo de goteros se encuentran los de trayectoria larga en laberinto. Se tienen los goteros de balín o de pistón, así como las mangueras con goteros; de estos dos últimos se muestran en la Figura 6. Este tipo de goteros tienen un número de Reynolds de $Re > 4000$.

Figura 6. Gotero de flujo turbulento. Los dos primeros goteros son de tipo pistón insertados en línea, los dos siguientes se incluyen dentro de la manguera (http:// www.eurodripusa.com/)

Las características principales que deben reunir los goteros para que sean funcionales son las siguientes:

-Hidráulicamente controlables, es decir, de gasto uniforme para condiciones preestablecidas de presión, de fácil instalación y reposición.

- De materiales resistentes al intemperismo y a productos químicos agrícolas.

- De bajo costo con relación a su vida útil.

Por la forma en que se conectan a la línea regante, se clasifican en:

- Conectados en la línea y dentro de ella (Figura 6) y conectados sobre la línea (Figura 7).

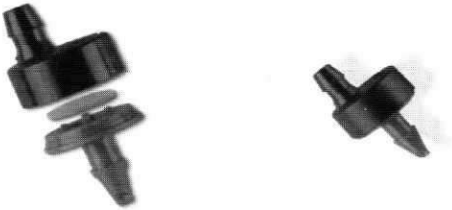


Figura 7. Goteros de flujo turbulento de conexión sobre la línea

-Cinta de goteo (Figura 8). Es hule planchado que al presurizarse adopta la forma cilíndrica del tubo, se fabrica bajo el mismo principio de turbulencia y se integra en el mismo hule o se le solda una pastilla con laberintos (imagen tercera de izquierda a derecha de la Figura 8), todo con la finalidad de evitar la influencia de la temperatura del agua y que funcione con flujo turbulento. Sin embargo, Munguía *et al.* (2003) y Román *et al.* (2006), han encontrado influencia de temperatura en cintas de goteo sin pastilla. Se distribuyen en rollos de 1500 a 2000 m de longitud con salidas de goteo a espaciamientos entre 20 a 50 cm. Para su instalación en campo se simplifica con el uso de un accesorio que se acopla al tractor para su colocación a 10 cm o más de profundidad.

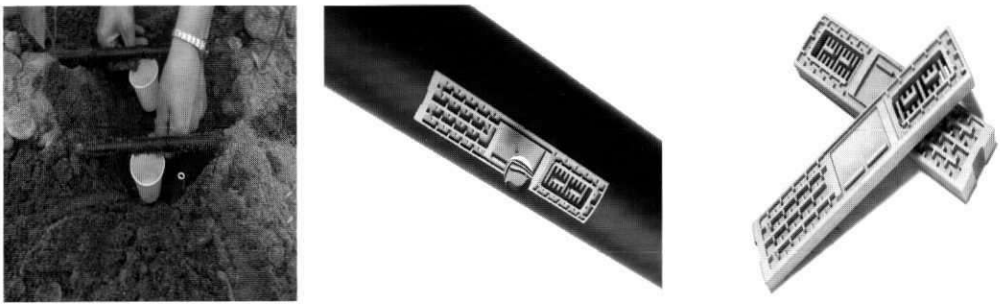


Figura 8. Cinta de goteo con formaciones (imagen centro) para inducir el flujo turbulento (http://www.eurodripusa.com/)

Tuberías de Conducción

Son los conductos cerrados que se utilizan para llevar agua desde el cabezal de control general hasta los "puntos de control" (Figura 9).

Estas tuberías pueden ser de asbesto-cemento, de Policloruro de Vinilo (PVC) o polietileno negro de alta densidad (PE-AD). Las dos últimas son las más comúnmente aceptadas por ser resistentes a las substancias corrosivas en el riego como ácidos y fertilizantes.

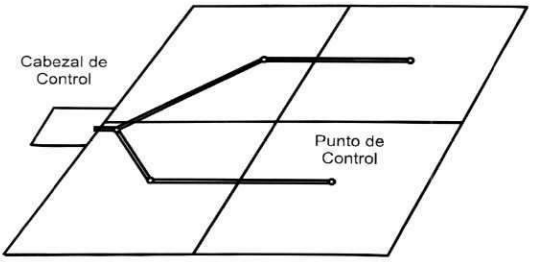


Figura 9. Red de la tubería de conducción

De los dos últimos materiales más utilizados, el PVC tiene las siguientes ventajas sobre el PE - AD:

- En diámetros de 50 mm o mayores son más económicas que el polietileno.

- Es de fácil instalación, sobre todo si es de unión con campana, además de que se evitan las fugas y se reduce el costo de mano de obra.

- No es dañado por los roedores, como es el caso del polietileno.

- Las áreas hidráulicas de conducción del PVC son mayores que los del polietileno, y las del asbesto-cemento o acero, logrando con ello disminuir la potencia de bombeo requerida en el suministro y, por consecuencia, menor costo de inversión y operación en la fuente de poder.

Cabezal de Control

El cabezal de control contiene los dispositivos necesarios para extraer el agua de la fuente de abastecimiento (pozo profundo y/o depósito de agua), para realizar la limpieza del agua de los sólidos por medio de filtros y posteriormente cuándo se requiera realizar la mezcla con la solución nutrimental depositada en el tanque dosificador, y por último inyectar a presión el agua a la tubería de conducción (Figura 10).

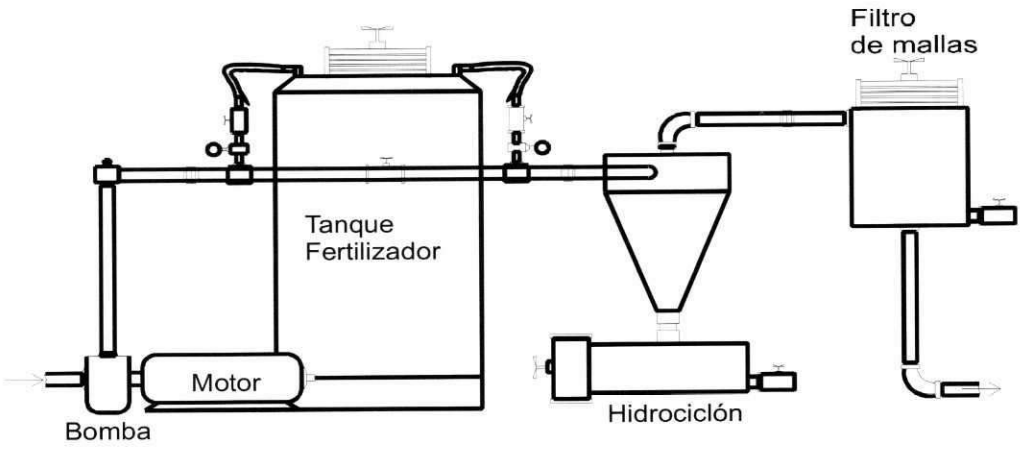


Figura 10. Esquema de los componentes de un cabezal de control típico en un sistema de riego por goteo

Un cabezal de control típico está conformado por los siguientes dispositivos:

Fuente de Poder

En algunos casos es factible el uso de un depósito de agua elevado como fuente de poder o simplemente cuando existe diferencia significativa de elevación entre el predio a irrigar y la fuente de agua y se podría utilizar esta carga de posición para proporcionar la presión que el sistema requiere. Esto no es frecuente, por lo que normalmente se utiliza una motobomba (bomba y motor) que proporcione una presión de trabajo de aproximadamente 3.5 kg cm^{-2} (343.2 KPa) para poder operar el sistema en forma adecuada.

Fertilizador

Es un dispositivo mediante el cual se introduce la solución de fertilizantes y/o ácidos al sistema y se puede seleccionar de las dos formas siguientes:

Dosificador(es) de tanque con tapa hermética

Para este caso se aprovecha la presión proporcionada por la fuente de poder del sistema de riego por goteo, estableciendo un gradiente de presiones por medio de un conector, este tipo de dispositivos ya está descontinuado, sin embargo, puede adaptarse fácilmente en forma simple. Tiene la desventaja que la concentración cambia durante la aplicación (Figuras 10 y 11).

Dosificadores de tanque abierto

Cuando se opta por esta alternativa es necesario una inversión adicional en la fuente de poder de una motobomba generadora de presión (bomba de paletas, de engranes o de pistones y motor) que proporcione una presión mayor o igual a la que está trabajando el sistema. Su desventaja es que la bomba utilizada debe ser resistente a la corrosión de los agroquímicos (Figura 12).

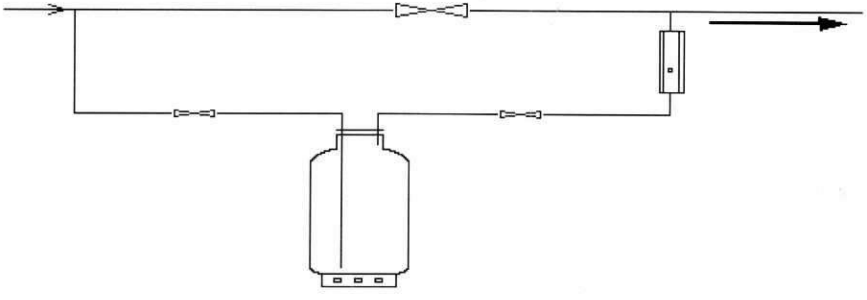


Figura 11. Dosificador de tapa hermética

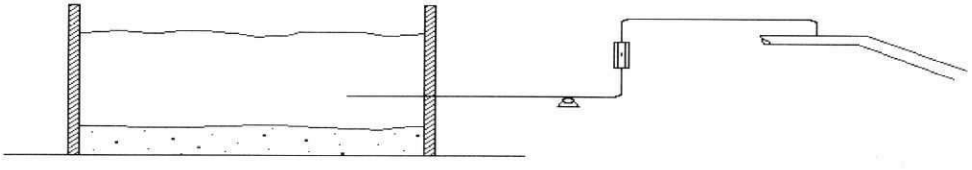
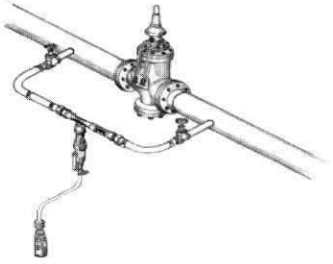


Figura 12. Dosificador de tanque abierto

Inyector venturi de fertilizantes con válvula

Estos inyectores se instalan para derivar un caudal de la tubería principal del sistema de riego aguas arriba de la válvula. El agua derivada entra en una tubería ramal de menor o igual diámetro, en la cual se coloca un dispositivo conocido como "venturi", que consiste en una reducción de área de paso del agua, de tal manera que al pasar se incremente su velocidad de flujo. En esta sección se conecta el recipiente conteniendo el fertilizante aprovechando que en este punto se produce una succión. Al cerrar parcial o totalmente la válvula de la tubería principal y estando abiertas las dos válvulas de derivación (antes y después del dispositivo venturi), se obliga al fluido a pasar por el ramal hasta desembocar en la tubería principal. Entre más cerrada esté la válvula de la tubería principal, mayor será el caudal que pasará por el venturi, y mayor será la succión en el tanque fertilizador en la que se sumerge la manguera conectada al dispositivo venturi (Figura 13).



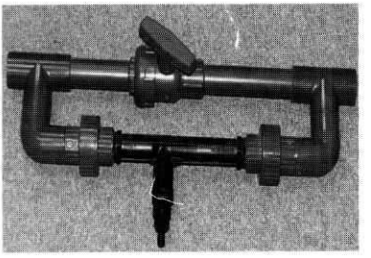


Figura 13. Venturi inyector de fertilizantes con válvula reguladora de presión (Izq) y en línea mediante "By-Pass". (Adaptados de http://www.mazzei.net/)

Bomba centrífuga con inyector venturi

Se emplea donde el sistema es de muy baja presión tal que el "venturi" no puede trabajar en su rango de presión. Se usa la bomba centrífuga (Figura 14) para generar una diferencia de presión entre dos puntos de la tubería principal del sistema de riego que permita la inyección de la solución fertilizadora. La succión de la bomba, se instala en la tubería principal y a la descarga se conecta al fertilizador venturi, de manera que al

trabajar, bombea un gasto adecuado para que pase por el cuerpo del venturi generando la succión de la solución fertilizadora que se incorpora a la tubería y la conduce hasta la tubería principal para ser distribuida en el sistema de riego.

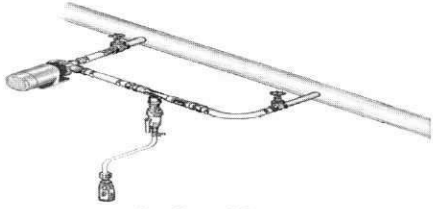


Figura 14. Bomba inyectora de fertilizantes con bomba centrífuga y venturi (Adaptada de http://www.mazzei.net/).

Bombas de inyección de pistón o de diafragma (para altas presiones)

El uso de este tipo de bombas se ha generalizado más en sistemas de riego por aspersión, aunque también se pueden utilizar en sistemas de riego por goteo (Figura 15). Las bombas de inyección de fertilizantes funcionan con energía eléctrica o con energía hidráulica. Generalmente son bombas de pistón que operan con una cámara de bombeo que se llena de solución fertilizadora al desplazarse el pistón hacia afuera de la cámara transportándola hacia el sistema de riego; un esquema típico de su instalación se muestra en la Figura 12.

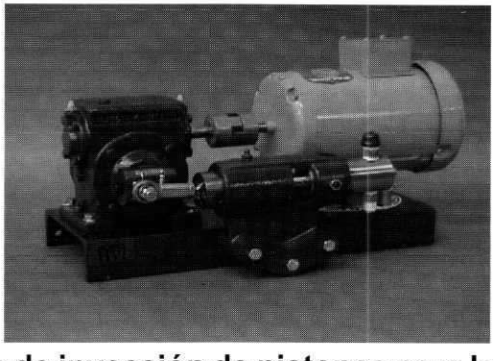


Figura 15. Bomba de inyección de pistones para la incorporación de fertilizantes en riegos a presión (Adaptada de http:// www.inject-o-meter.com/)

Inyectores de fertilizantes automatizados

Este tipo de dispositivos se conocen como controladores de fertirrigacion, y se utilizan en forma automatizada los volúmenes de agua de riego y nutrimientos requeridos por el cultivo de acuerdo a sus requerimientos durante su ciclo vegetativo. La Figura 16 muestra este tipo de dispositivos. Generalmente se conectan a una computadora para manipularse por control remoto. Ambos equipamientos están provistos de inyectores tipo venturi o bombas de diafragma o pistón resistentes a ácidos o líquidos altamente corrosivos producto de la mezcla de fertilizantes con el agua de riego para proporcionar los elementos químicos primarios, secundarios o menores requeridos por la planta para su crecimiento, producción y calidad de fruto deseado.

La solubilidad eficaz del agua con los nutrimientos mediante reacciones químicas dentro de la red de tuberías del sistema de riego presurizado se controla por medio el volumen o caudal de agua (q) inyectado, la conductividad eléctrica (CE) y el pH de la mezcla. Los equipos mencionados cuentan con sensores para indicar dichos valores, uno de ellos, el que se conecta a una computadora; está provista de un filtro de retrolavado automático para eliminar sólidos que no alcancen a solubilizarse o provengan de una precipitación química; el otro inyector requiere filtrado a su salida, sólo automatiza la fertilización y está provisto de una alarma que detiene o regula su funcionamiento si este no está en los valores programados de (q, CE, pH).

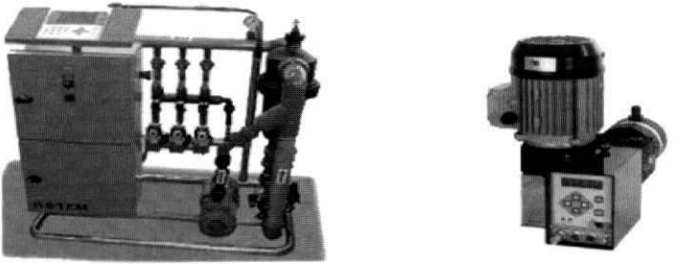


Figura 16. Inyectores de fertilizantes automatizados (Adaptado de http://www.rotem.com/green9.html y http://www.itc.es/)

Filtros

En todo equipo de riego por goteo es indispensable un grupo de filtros, cuyas características dependerán de la pureza del agua. La finalidad es eliminar todos los sólidos que puedan obstruir el flujo del agua en los goteros, ya que el problema principal en un sistema de riego localizado es la obstrucción parcial o total de los emisores causados generalmente por las incrustaciones de materiales de naturaleza orgánica o inorgánica.

Los tipos de filtros más utilizados son el filtro hidrociclón, filtro de malla y filtro de arena.

Filtro hidrociclón o desarenador

En los casos donde el agua de riego contenga en forma significativa arena disuelta, es importante utilizar un filtro desarenador o hidrociclón (Figura 17). Estos filtros eliminan materiales sólidos más pesados que el agua. Los dispositivos eliminan sólidos hasta de 74 micrones; funcionan por el sistema de vórtice, por el cual al girar el agua debido a la fuerza centrífuga, lanzan los sólidos hacia las paredes desde donde resbalan al fondo al decantador del filtro. En el centro del mismo se produce un flujo ascendente del agua tratada que sale por la parte superior, la cual está ya en condiciones de pasar a la siguiente etapa, el tipo de filtro puede operar hasta una presión máxima de 7 kg cm^{-2} y la pérdida de carga localizada debido a su conexión debe proporcionarla el fabricante. Este tipo de filtro no puede eliminar algas, cieno, arcillas y bacterias; la instalación de un desarenador o hidrociclón debe colocarse antes del filtro de malla.

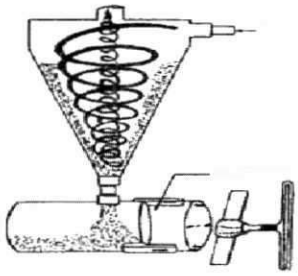


Figura 17. Filtro hidrociclón o desarenador comúnmente utilizado en agua con alto contenido de arenas disueltas

Filtro de malla

El filtro de malla es el dispositivo más sencillo y el más comúnmente utilizado en los sistemas de riego por goteo y se usa para retener los sólidos contenidos en el flujo de agua que el hidrociclón fue incapaz de detener, como la arcilla, cieno y/o bacterias. Son conocidos como de malla, cedazo o tamiz y de anillos filtrantes, y son generalmente de acero inoxidable o náilon. El tamaño de la red se expresa por el número de filamentos por pulgada, que es una red de acero o náilon similar a la tela de una red de mosquitero. En general, no son recomendadas mallas más finas que las representadas por el número 200. Existen filtros de malla manuales y de retrolavado automático, de materiales plásticos y metálicos como los que se muestran en la Figura 18. Este tipo de filtros se fabrican completamente metálicos, plásticos o combinados de ambos, la Figura 18 a su izquierda, muestra un filtro metálico con cuerpo cilíndrico exterior y en su interior contiene la malla formada con un tubo de PVC perforado y con una malla de náilon por encima de su diámetro exterior.

Con la automatización de los sistemas de riego localizados, los filtros se fabrican de retrolavado automático como el que aparece en la parte derecha de la Figura 18, en donde la entrada del flujo bombeado es por la tubería transversal al cuerpo cilíndrico y el agua filtrada sale por la parte baja del mismo. Cuando la circulación se obstruye por la suciedad del filtro, baja la presión requerida en la entrada de la conducción y entonces se

activa el motor en la parte superior del filtro, accionando el retrolavado durante un tiempo programado. En estos casos es importante una batería de al menos dos filtros para que mientras uno se limpia el otro siga filtrando, y así se siga bombeando agua filtrada al sistema de riego. En el Cuadro 1 se muestran las características de las mallas más comunes usadas en riego por goteo.

Cuadro 1. Mallas para filtros y su selección

Mallas N°	mm	Micrones 1/1000 mm	Milésimas 1/1000 Pulg.
4	3.50	3,500	150
6	2.50	2,500	100
10	1.50	1,500	60
20	0.80	800	30
30	0.50	500	20
50	0.30	300	12
75	0.20	200	8
120	0.13	130	5
155	0.10	100	4

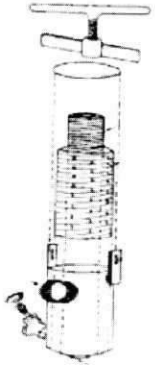


Figura 18. Filtro de malla conectados en serie (Adaptado de http:// www.amiad.com/auto/ebs2.htm

Filtro de arena

Cuando se recurre al agua superficial como fuente de abastecimiento, es imprescindible utilizar un filtro de arena de retrolavado automático o manual según el equipo que se instale. La arena del filtro debe reemplazarse anualmente, lavando previamente la arena nueva para eliminar el polvillo que pueda contener (Figura 19). Además este tipo de filtros eliminan algas o bacterias que los de hidrociclón o mallas no pueden eliminar, y son ideales para usarlos en el riego automatizado. El medio filtrante dentro del filtro son gravas y arenas de diferentes tamaños colocados en forma adecuada dentro de un tanque de forma cilíndrica donde el agua se filtra al pasar por dicho conglomerado. En general, se necesitan dos tanques necesarios para hacer el retrolavado; cuando se requiere, el flujo de bombeo a uno de ellos se obstruye por medio de una válvula y se abre otra en su parte inferior para que entre agua filtrada y se expulsen al exterior las impurezas que se encuentran en el medio filtrante por la parte de arriba, el mismo procedimiento de lavado se le hace al otro tanque de tal manera que queden limpios, la acción de limpieza se realiza por un determinado tiempo, o por diferencias de cargas hidráulicas entre la entrada del filtro y la salida de los mismos.

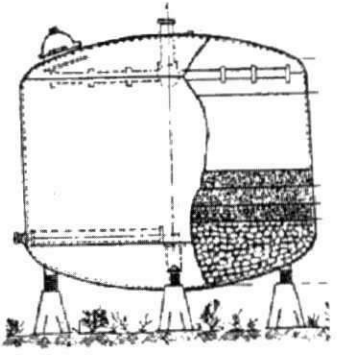


Figura 19. Representación esquemática y fotográfica del filtro de arena

Selección del filtro en base al tipo de fuente de agua utilizada

El contenido de sales presentes en el agua de riego puede presentar problemas de precipitados de fósforo y calcio y causar taponamiento de goteros. Los sólidos en suspensión en el agua incluyen partículas de suelo cuyo tamaño varía desde arcillas finas hasta arenas gruesas, organismos vivos como bacterias y algas, y una amplia variedad de materiales arrastrados por el agua. La cantidad de sólidos en suspensión varía considerablemente de un día a otro y de una estación a otra, sobre todo, cuando la fuente de agua es un río, lago, canal o embalse. Como los sólidos en suspensión por encima de un cierto tamaño se deben separar del agua por medio de su filtrado antes de su entrada a la conducción, es, necesario estimar la cantidad total de sólidos que podrían retenerse en el filtro.

Si el agua de riego contiene más de 0.1 mg L^{-1} de sulfuros, la bacteria sulfurosa puede crecer dentro del sistema de riego formando una masa lodosa que pudiera atascar los filtros y emisores. La distribución del tamaño de las partículas en suspensión es el parámetro más importante para el diseño del elemento filtrante, y define en qué medida será eficaz y el grado de filtración deseado. El éxito de la fertirrigación y la longevidad del equipo al menos hasta su período de reemplazo del sistema de riego dependen de la limpieza del agua con el tipo de filtro adecuado. Esto se determina con el diseño del emisor seleccionado (goteo o microaspersor) y de las características del agua de riego, en cuánto a su contenido de sólidos en suspensión e iones disueltos. El Cuadro 2 muestra una guía en cuanto a problemas de filtración y la recomendación del filtro más adecuado.

Cuadro 2. Tipo de filtrado de agua para sistemas de riego localizado con base en la fuente de agua. Adaptado de Agricultura de las Américas (1992)

Fuente del agua	Tipo de Aprovechamiento.	Material de obstrucción común	Tipo de filtro
Subterránea	Pozos cavados	- Arenas -Carbonato de calcio	- Malla
	Pozos perforados	- Arenas - Depósitos calcáreos - Hierro	- Hidrociclón - Malla
Superficial			
	Ríos, riachuelos	- Materia orgánica - Algas - Bacterias	- Arena - Malla
	Canales	- Algas - Bacterias - Materia orgánica	- Arena - Malla
	Represas	- Algas - Bacterias - Materia orgánica	- Arena - Malla

Dispositivos de Control

Manómetros

Su función es indicar la presión con la que el agua se conduce dentro de la tubería en puntos de control de la unidad de riego, en la descarga de la bomba (antes y después de los filtros). Se utilizan comúnmente los manómetros de Bourdon (Figura 20).

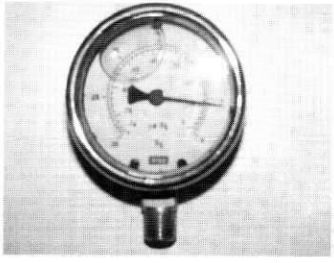


Figura 20. Manómetro tipo Bourdon

Medidor volumétrico y de gasto

- Cuando el gotero no es hidráulicamente controlable (laminar o transicional) se utiliza este aditamento para conocer el gasto consumido por el sistema en un momento determinado, así como para acumular el volumen aplicado.

- Para determinar el tiempo de aplicación de nutrimentos del dosificador se utiliza un medidor de gasto tipo rotámetro como el que aparece en la Figura 21.

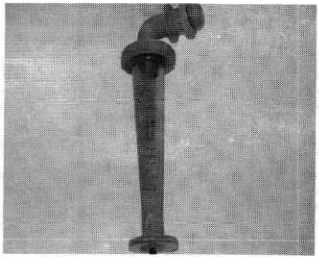


Figura 21. Medidor de gasto tipo rotámetro

Reguladores de presión

Dispositivos que al originarse pérdidas de carga controlan la presión y el gasto.

Poseen un resorte y en un obturador transversal del área de flujo (Figura 22).

Válvulas

Son dos los tipos de válvulas que se utilizan más comúnmente (Figura 23):

- De globo. Se usa para regular presión en el punto de alimentación de la unidad de riego y en el cabezal de bombeo (Figura 23a).

- De compuerta. Se utiliza en la obstrucción y recirculación de caudales en el equipo de bombeo (Figura 23b).

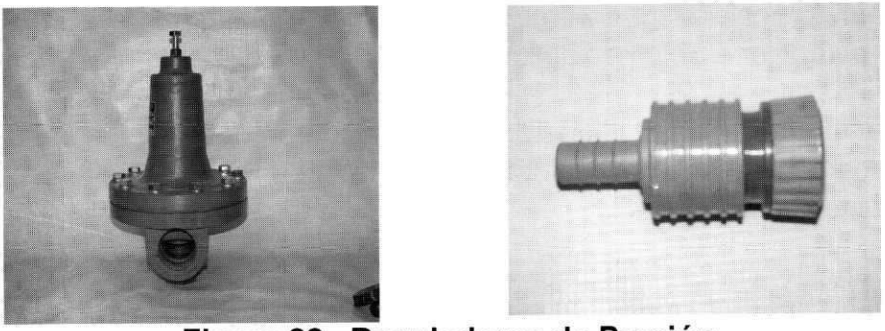
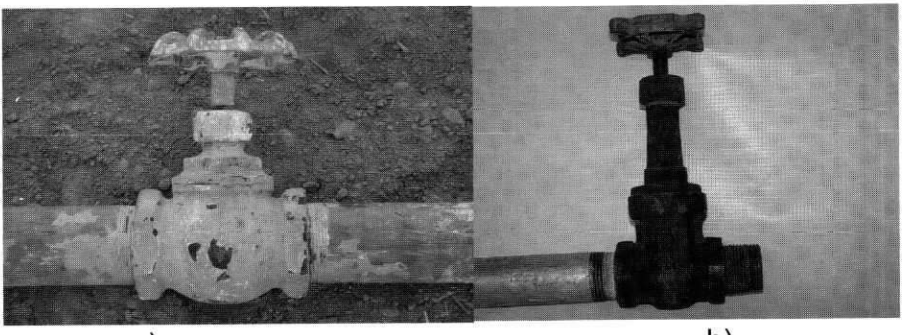


Figura 22. Reguladores de Presión



a) b)

Figura 23. Tipos de válvulas más comunes que se utilizan en riego por goteo: a) globo y, b) de compuerta

Ventajas del riego por goteo

Como ventajas importantes del método de riego por goteo se pueden mencionar las siguientes:

1. Se incrementan los rendimientos agrícolas tanto en cantidad y calidad, así como la uniformidad de frutos y fechas de recolección.

2. Debido a las condiciones óptimas de humedad propiciadas por el método de riego por goteo, tanto en cultivos anuales como en frutales, adelanta la época de producción permitiendo con ello llevar los productos al mercado en épocas de mayor demanda.

3. No es necesario efectuar trabajos de nivelación del terreno, ya que con este método no se tienen pérdidas de agua por escurrimiento superficial evitándose los problemas de erosión y manteniendo la fertilidad de los suelos, la cual en caso de alterarse tarda mucho tiempo en volver a su normalidad y, por lo mismo, se necesita que transcurra mucho tiempo para que el suelo alcance su productividad plena y para que el agricultor empiece a recuperar el capital invertido.

4. Este método de riego permite un buen manejo de suelos arenosos en cuanto a riego y fertilización.

5. Los nutrimentos en solución se pueden introducir a la red de riego correctamente dosificados y en función de las necesidades del cultivo.

6. Está formado por un equipo que permite una operación tan fácil que puede llegar a su automatización total, logrando un ahorro considerable de mano de obra.

7. No resulta afectado en la aplicación del riego o fertilizantes, por vientos fuertes o por algún otro fenómeno meteorológico.

8. No afecta las labores de cultivo, el control de plagas o enfermedades ni la cosecha, por lo que se pueden realizar sin problemas en el momento más oportuno.

9. Permite aprovechar fácilmente agua con altos contenidos de sales solubles debido a las condiciones de baja tensión a la que se encuentra retenida el agua en el suelo.

10. Se reduce la incidencia de malas hierbas, especialmente en regiones con lluvias escasas, por lo que en este aspecto también se ahorra mano de obra.

11. Permite el máximo aprovechamiento del recurso hídrico, que en ocasiones, por ser tan limitados en gasto, sería antieconómico usarlos en la agricultura con otros métodos de riego; además, es un método muy ventajoso para regar cultivos donde el agua se extrae a un costo muy elevado, como sucede en la explotación de acuíferos muy profundos.

12. Las pérdidas de agua por conducción desaparecen y disminuyen las pérdidas por percolación.

Desventajas del riego por goteo

1. Debido a su elevado costo de inversión inicial, únicamente debe utilizarse en cultivos altamente remunerativos como hortalizas y frutales.

2. Es necesario disponer de tuberías, goteros y piezas especiales que sean suficientemente resistentes tanto a las altas presiones como a los severos efectos del intemperismo a los que son sometidos en las zonas áridas y semiáridas, donde las líneas regantes del sistema deben colocarse superficialmente.

3. En estos sistemas de riego es común el taponamiento de goteros, por lo que deben utilizarse dispositivos especiales de filtración para evitar el

paso de partículas que puedan obstruir la salida del agua en ellos.

4. Los materiales fertilizantes que se apliquen con el agua de riego deben ser altamente solubles a fin de evitar incrustaciones en tuberías y goteros.

5. Es necesario la vigilancia de la operación de los sistemas de riego ya establecidos para detectar oportunamente cualquier irregularidad en el funcionamiento.

6. Para el buen funcionamiento del riego por goteo se requiere de personal capacitado en la operación y mantenimiento del sistema.

AUTOMATIZACIÓN DE LOS SISTEMAS DE RIEGO LOCALIZADO

Antecedentes

La automatización de sistemas de riego a presión localizados ha evolucionado en el riego de jardines públicos y privados, campos deportivos, y poco a poco se está implementando en la agricultura. Se sugiere tomar como guía lo contenido en la Figura 24 para seguir el escrito de la siguiente manera:

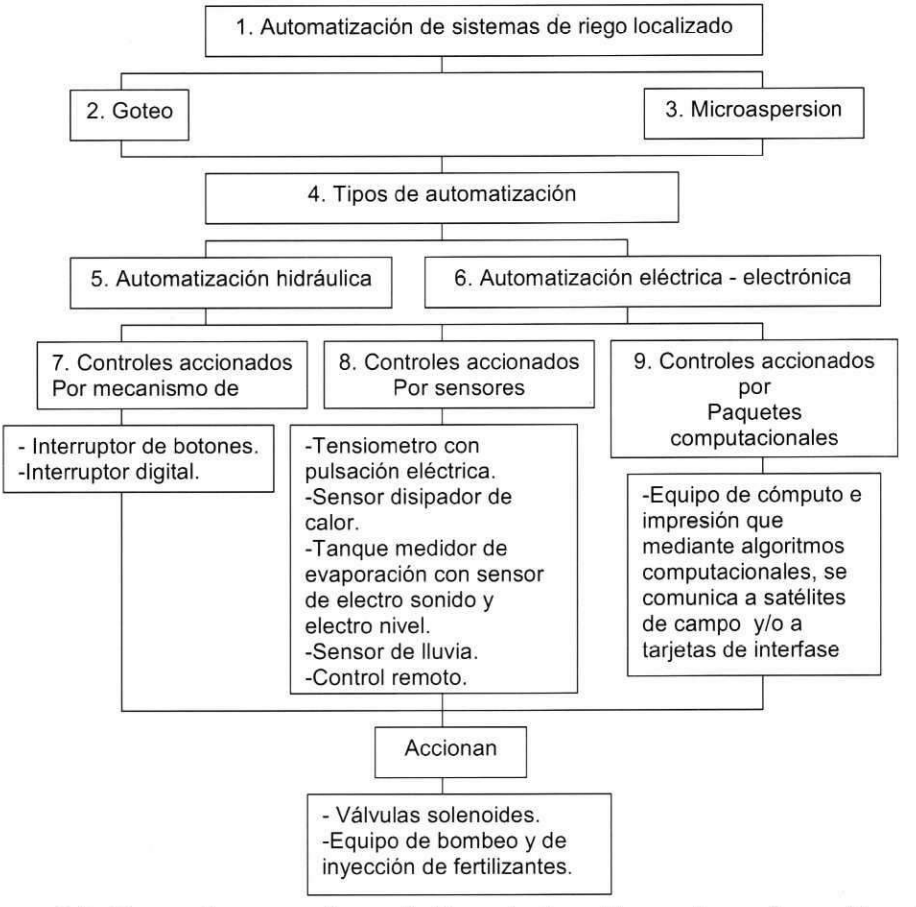


Figura 24. Organigrama descriptivo de los tipos de automatización en sistemas de riego presurizado

En cada cuadro del diagrama de flujo de la figura además del texto, aparece un número el cual indica el orden de explicación de cada uno de los conceptos que se encuentran dentro de los cuadros del diagrama.

Automatización de sistemas de riego localizado (1)

La automatización del riego a presión es un aspecto innovador de los países industrializados que ha evolucionado en los sistemas residencial, comercial, municipal y campos deportivos. En la mayoría de las universidades de los EUA se utiliza esta tecnología en la irrigación de lotes experimentales controlados desde una unidad central, y se implementan en pequeña escala en lotes productivos agrícolas básicamente hortalizas y frutales. En Culiacán, México, en muchos campos agrícolas de producción de hortalizas se tiene también considerable infraestructura sobre esta tecnología de automatización con sistemas de riego por goteo.

Un sistema de riego localizado puede ser automatizado de dos maneras: en forma hidráulica y/o electrónica. Resulta importante conocerlas para seleccionar la variante adecuada que requiera menor inversión y mantenimiento del mismo. Mayores facilidades de adquisición de materiales y flexibilidad de los componentes que accionen el riego, mediante su enlace con estaciones climatológicas automatizadas a computadoras personales o de red.

Sistemas de riego por goteo y microaspersión (2 y 3)

El CENID-RASPA ofrece la tecnología para el diseño, instalación, operación y mantenimiento de los sistemas de riego localizado, así como resultados de investigación en hortalizas y frutales, los cuales se encuentran disponibles para su utilización en la producción agrícola. En la actualidad se cuenta con el conocimiento y experiencia necesaria para automatizar por completo la operación de estos sistemas. A continuación se pretende compartir esta información acerca del conocimiento, selección y adopción de la mejor manera de automatizar los sistemas de riego localizado de una manera simple.

Tipos de automatización (4)

Como ya fue citado, existen dos tipos de automatización: la hidráulica y la electrónica. La primera consiste en aprovechar la presión hidráulica del sistema de riego, y mediante tuberías piloto abrir y/o cerrar válvulas o accionar un dispositivo de encendido y apagado del equipo de bombeo (Figuras 25 y 26). Conforme al avance tecnológico de los sensores, que son fundamentados básicamente en circuitos electrónicos accionados por electricidad (ejemplo del reloj-despertador que acciona un radio), la automatización eléctrica-electrónica surge basada en sistemas de cables eléctricos sobre el sistema de tuberías de riego para controlar válvulas solenoides eléctricas y equipos de bombeo, como se muestra en las Figuras 27 y 28.

Automatización hidráulica (5)

Este tipo de automatización básicamente fue creado para proteger al sistema de tubería de altas presiones que pudieran afectar al sistema de riego. Estos sistemas no son comunes para programar el encendido y apagado de tales dispositivos. Se generaron controladores hidráulicos con mecanismos de reloj electromecánicos (Figura 25) que prácticamente están descontinuados. El principio de un controlador hidráulico se muestra en la Figura 26, en donde se observa el tubo piloto conectado al controlador.

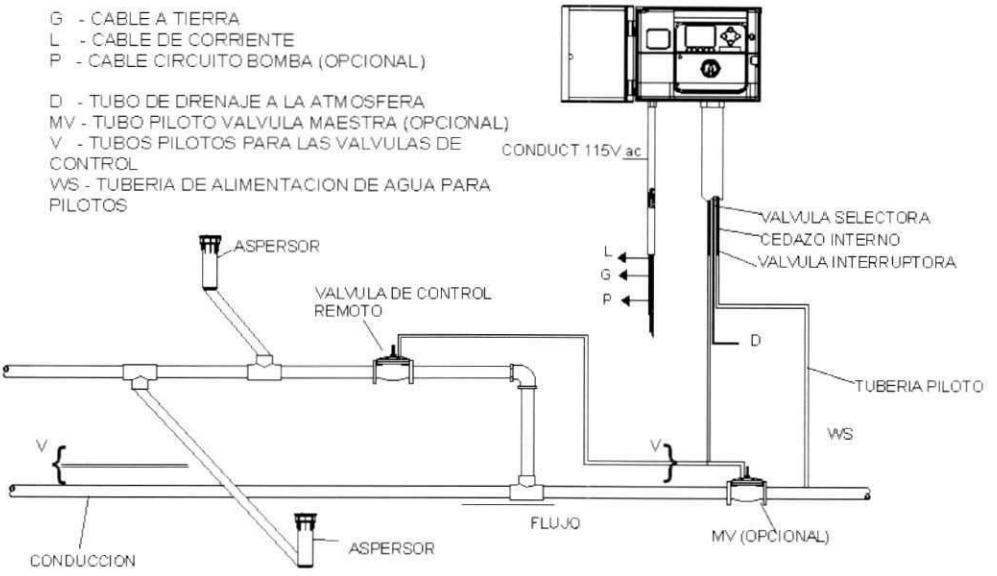


Figura 25. Instalación típica de tuberías a un controlador hidráulico

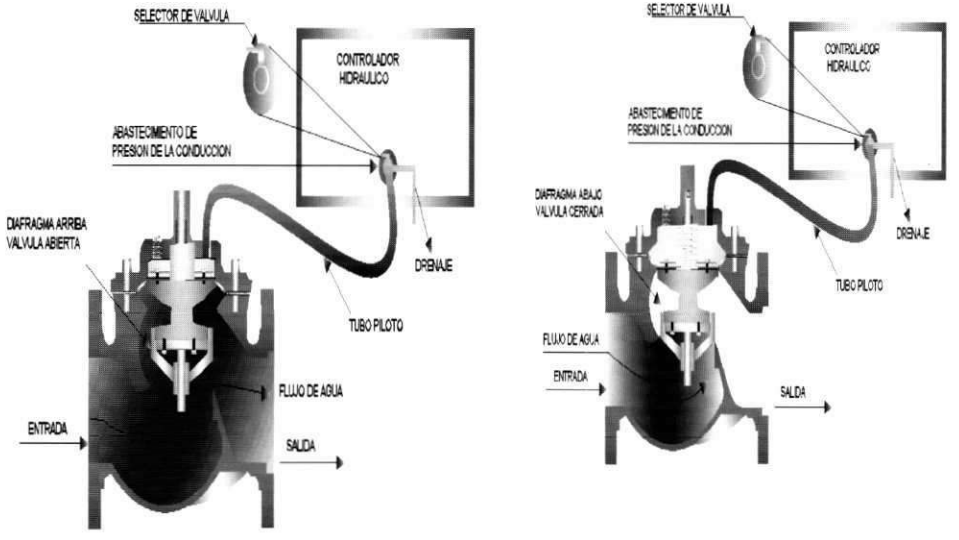


Figura 26. Operación de una válvula de control hidráulico

Automatización eléctrica-electrónica (6)

La automatización eléctrica-electrónica es la más generalizada debido a su flexibilidad para integrar los famosos sistemas expertos en riego. Estos consisten en automatizar las acciones del cuándo y cuánto regar los cultivos con la mínima intervención del hombre en la toma de decisiones. Dichas acciones son tomadas por la computadora que esta sincronizada con la programación del cuánto y cuándo regar con base en las señales emanadas de sensores que detectan abatimientos de humedad en el suelo o bien, por medio de una estación climatológica automatizada que proporcione información climática continua a la computadora para estimar las necesidades hídricas del cultivo y tomar decisiones para accionar el riego al estimar que el consumo programado se ha efectuado, con lo anterior se repone la lámina consumida y se detiene el riego cuando esta ha sido satisfecha. Un caso sencillo de este tipo de automatización se muestra en las Figuras 27 y 28, en donde, la red con líneas suspensivas sobre el sistema de riego representa la aplicación del sistema de automatización de la Figura 27.

La automatización eléctrica-electrónica se puede clasificar por la forma de programar el riego en las siguientes tres tipos:

Controles accionados por mecanismos de reloj.

Controles accionados por sensores.

Controles accionados por paquetes computacionales.

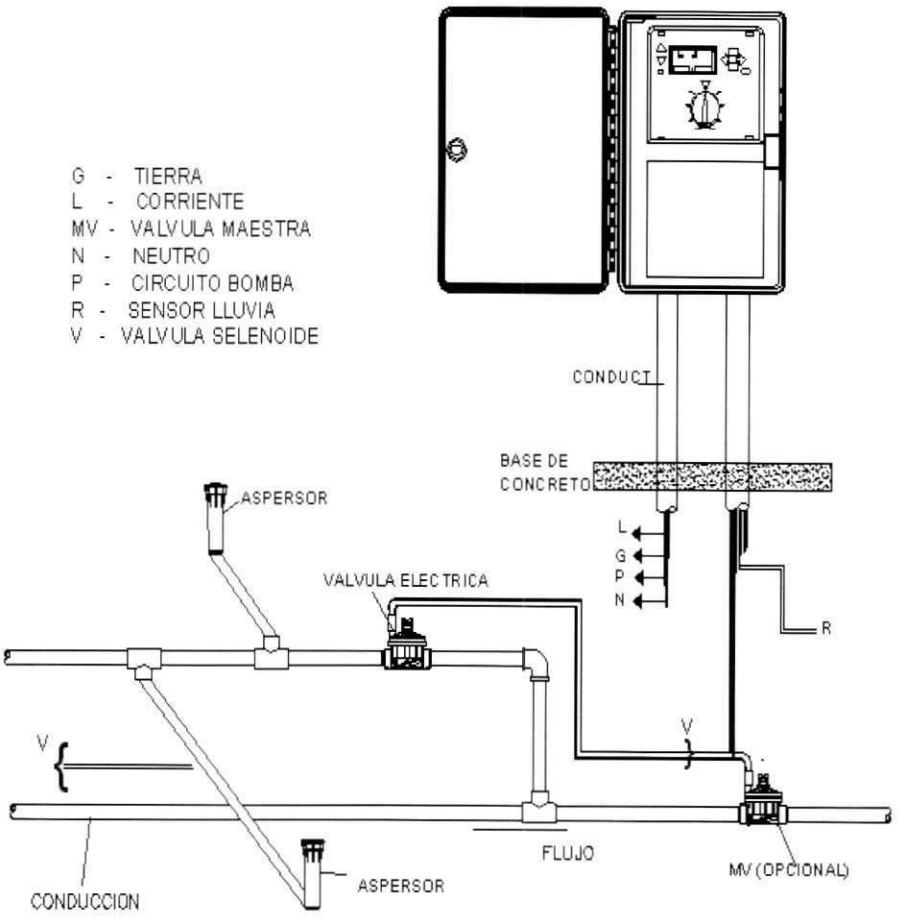


Figura 27. Instalación típica de tuberías y cables a un controlador eléctrico

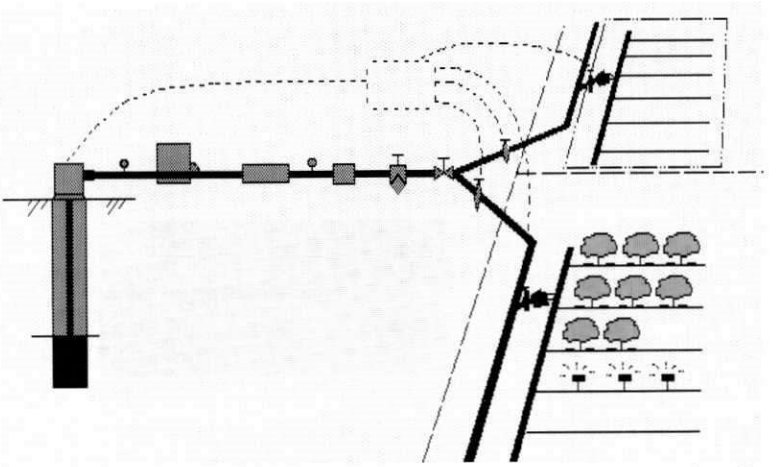


Figura 28. Representación esquemática de un sistema de riego por goteo automatizado.

Controles accionados por mecanismos de reloj (7)

Existe una gran variedad de controladores en diseños y marcas que se requiere de experiencia al respecto para seleccionar el más adecuado de acuerdo a su calidad y bajo costo. En cuanto a su evolución se generaron controles de botones y actualmente de pulsación digital (Figuras 29 y 30). La conexión de estos controladores a la bomba y válvulas se visualizan en las Figuras 27 y 28, donde se puede observar que se requiere una red de cables eléctricos en todo el predio agrícola.

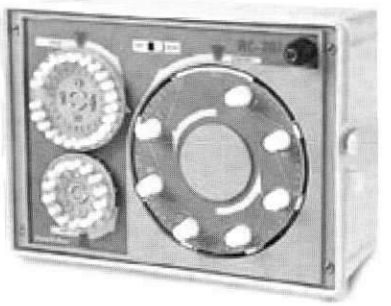


Figura 29. Controlador eléctrico-electrónico de botones

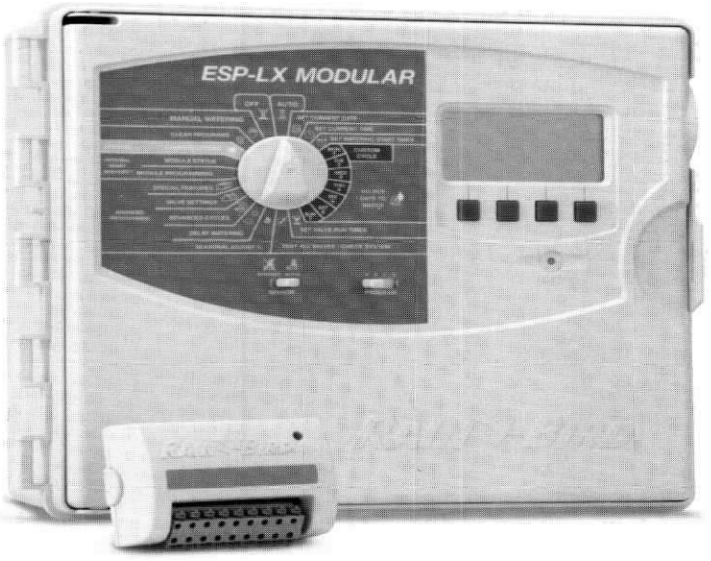


Figura 30. Controlador eléctrico-electrónico digital

Todos los controladores tienen un número de estaciones que activan, siendo cada una de ellas una válvula o dispositivo de encendido y apagado del equipo de bombeo, también deben tener terminales para un sensor de lluvia y humedad del suelo. Algunos fabricantes incluyen estos como interruptor lógico del controlador y no como estación.

El rango de estaciones de los controladores de botones o digitales va desde cuatro a 24 estaciones; si se tiene un sistema que requiera más de 24 estaciones entonces requerirá otro equipamiento conocido como "satélite de campo" como el que aparece en la Figura 31, que puede controlar hasta 101 estaciones. Estos satélites están provistos de tarjetas de computación que pueden programarse en el mismo campo o bien, conectarse a una central computarizada del sistema de riego como el de la Figura 32, y desde la oficina operar el satélite, realizar cálculos e imprimir reportes de programaciones de riego.

Figura 31. Satélites de campo (controladores eléctricos-electrónicos)

Figura 32. Central computarizada para el control de satélites de campo

Controladores accionados por medio de sensores (8)

Esta alternativa se restringe a controladores de hasta 24 estaciones; los sensores que controlan el equipo de bombeo son: tensiómetros con base en el contenido de humedad, sensor de tanque medidor de evaporación con electronivel, sensor de lluvia este último es inherente al sistema de riego automatizado, ya que detendrá el riego cuando la lluvia ocurra. Su principio se basa en un orificio con fondo que capta la precipitación en la cara superior de un cilindro, que al acumular una lámina de agua de lluvia manda la señal eléctrica para apagar la bomba; posteriormente y coordinado con el sensor de humedad éste accionará la bomba cuando la humedad del suelo se haya abatido a un déficit permisible de humedad en el suelo. Por último, la operación de un controlador por medio de una señal remota (similar al control de una TV) en la que una persona tiene que accionar el controlador para iniciar o detener el riego (poco usual).

Controladores accionados por paquetes computacionales (9)

Este caso es para superficies de gran magnitud, reportados anteriormente en las Figuras 31 y 32 (satélites y central computarizada), aparte de dichos casos es conveniente recalcar que algunas corporaciones han integrado paquetes computacionales basados en metodologías científicas que estiman la evapotranspiración de cultivos (ET) con datos climáticos históricos o bien, con datos en tiempo real capturados y transferidos por medio de una estación climatológica automatizada. Otra alternativa es conectar a una computadora personal un controlador denominado "control casero de interfase" (modelo CP-290 o X-10), que es una tarjeta externa de computación utilizada para encendido y/o apagado de aparatos domésticos como televisores, refrigeradores, luces, etc. Utiliza módulos o relevadores eléctricos con clavijas que se conectan en los enchufes de la pared.

El uso de este dispositivo (X 10 o CP 290) se aplica en sistemas de riego localizado y puede accionar hasta 256 estaciones (válvulas e inte-

rruptores); con un paquete computacional se calcula la evapotranspiración de los cultivos con información obtenida de estaciones climatológicas automatizadas vía MODEM. Al realizar el cálculo de la cantidad de agua demandada por el cultivo automáticamente el X-10 acciona el riego hasta abastecer el requerimiento.

En caso de presentarse problemas de comunicación con las estaciones climatológicas automatizadas, el X-10 tiene la opción de accionarse manualmente para finalizar el riego de acuerdo a su programación. La Figura 33 muestra un control de interfase X-I0.

Figura 33. Controlador X-10 para computadora IBM o PC compatible sustituto de un controlador eléctrico-electrónico

FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DE LOS COMPONENTES DE UN SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO

Las características de funcionamiento hidráulico de los componentes de los equipos de riego por goteo, deben estudiarse para conocer como diseñar estos sistemas y así garantizar la entrega uniforme del agua en cantidades necesarias para satisfacer los requerimientos de riego de los cultivos, de tal manera que los costos de los equipos así como los de operación sean económicos.

Funcionamiento hidráulico de goteros o emisores

En la actualidad a nivel mundial existe una gran variedad de tipos de goteros que han evolucionado para mejorar la uniformidad y lograr alta eficiencia en la aplicación de agua a los cultivos.

Los goteros o emisores son la parte fundamental del riego por goteo debido a que el diseño hidráulico, operación y mantenimiento de los sistemas dependen de las características de funcionamiento hidráulico de los goteros.

Respecto a las propiedades hidráulicas de estos dispositivos se ha encontrado que son afectados por su geometría y su régimen de flujo.

Geometría del gotero

Debido a las áreas de paso que se manejan en riego por goteo (0.5 a 2 mm^2) y además como el cuerpo del gotero es de material plástico, hace que pequeñas deformaciones (0.1 mm) ocasionadas por las temperaturas (en campo varían de 5 a 45 °C) afecten el gasto de manera considerable al evaluar la operación del gotero.

Régimen de flujo del gotero

El espesor de la capa límite es una medida cuantitativa de la rela-

ción que existe entre el flujo en movimiento y la pared que lo contiene, el espesor de la capa en material plástico o las velocidades y áreas de paso que se presentan en riego por goteo es un porcentaje considerable de la sección transversal. Cuando el régimen de flujo es laminar, las partículas tienden a viajar en líneas de corriente bajo la influencia de la pared del conducto; al aumentar la temperatura el fluido se vuelve menos viscoso y se rompen las líneas más alejadas de la pared fluyendo más ágilmente, por lo que aumenta el gasto.

En el Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación – Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (CENID-RASPA) antes CENAMAR se encontró el modelo 1 que describe el funcionamiento hidráulico de los goteros, con un coeficiente de determinación de 0.99 y un error estándar de 0.03.

$$Q = K H^X T^Y L^Z \qquad 1$$

Donde, **Q** es el gasto del gotero ($L\ h^{-1}$), **K** el coeficiente que depende de la geometría del gotero obtenido por regresión, **H** corresponde a la carga hidráulica del gotero en metros de columna de agua (m), **T** es la temperatura del agua (°C), **L** es la longitud de recorrido del flujo dentro del gotero (m), **x** es el exponente que depende del régimen de flujo, **y** se refiere al efecto de la temperatura, y finalmente **z** es el exponente que indica el efecto de la longitud de recorrido del flujo, dichos exponentes se obtienen por regresión y son adimensionales. Para goteros de flujo transicional donde la geometría del gotero no permite el flujo turbulento, la ecuación 2 permite predecir el gasto.

$$Q = K H^X T^Y \qquad 2$$

Para goteros de flujo turbulento (hidráulicamente controlables) la ecuación 3 representa esta relación en forma precisa.

$$Q = K H^X \qquad 3$$

La Figura 34 presenta el estudio del gotero tipo espagueti ó microtubo de 1 mm en la cual se distingue la variación del gasto en función de la carga, temperatura y longitud (1, 2, 3 y 4 m). Análogamente, la Figura 35 presenta el estudio hidráulico de un gotero de geometría rígida y flujo

laminar. Asimismo, la Figura 36 se presenta el estudio hidráulico de un gotero de geometría rígida y flujo turbulento en donde se aprecia que no existe variación del gasto por cambios de temperatura. Finalmente la Figura 37 muestra el estudio hidráulico de una cintilla-goteo que es afectada por la temperatura; sin embargo, otras no son sensibles a esta variable climática (Munguía *et al.*, 2003).

En el Cuadro 3 se presentan los parámetros de las ecuaciones obtenidas en estudios de funcionamiento hidráulico de goteros, así como los coeficientes de determinación y variación de los datos muestreados con respecto al modelo obtenido.

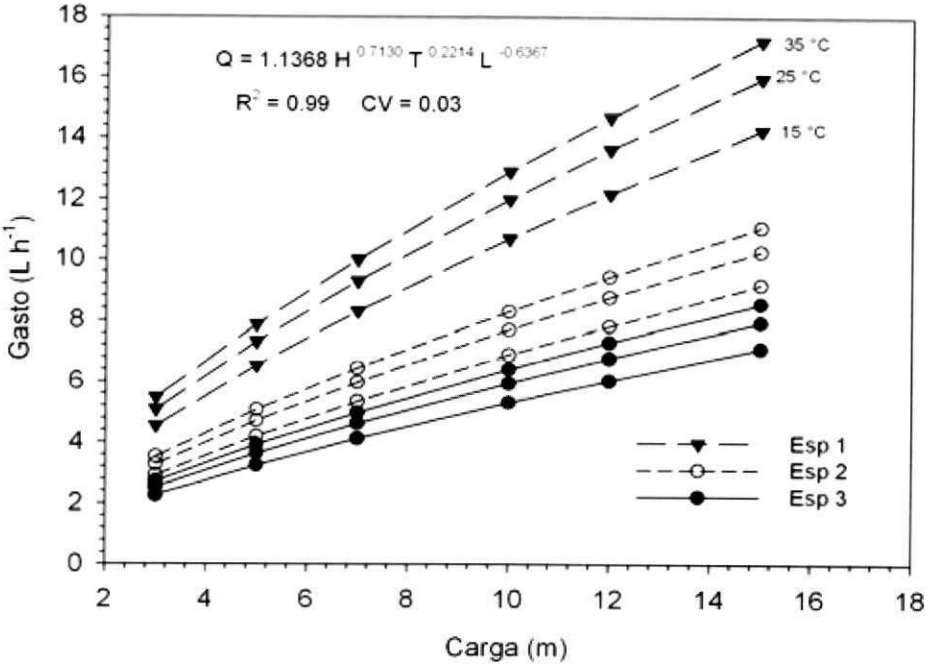


Figura 34. Estudio del microtubo (1 mm Φ) Esp.=Espagueti o microtubo (Peña *et al.*, 1979)

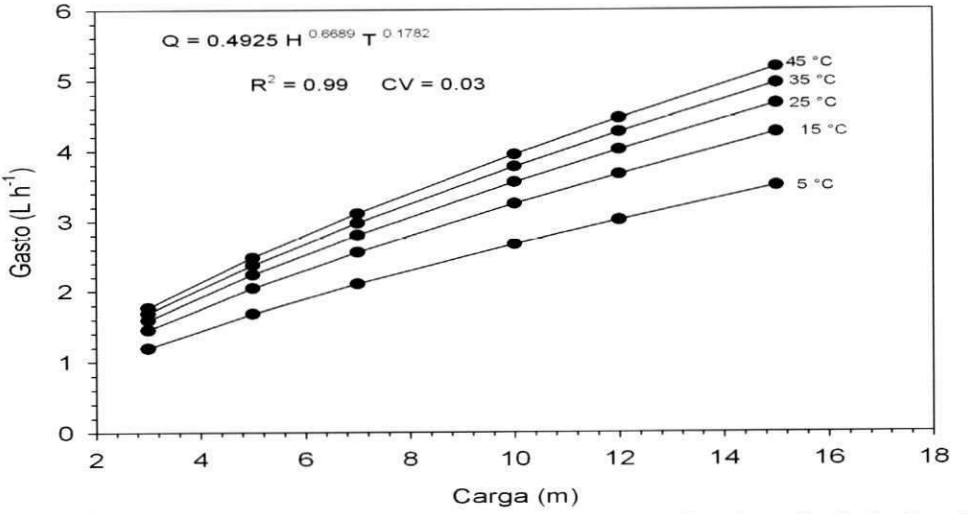


Figura 35. Estudio de un gotero de geometría rígida y de flujo laminar (Peña *et al.*, 1979)

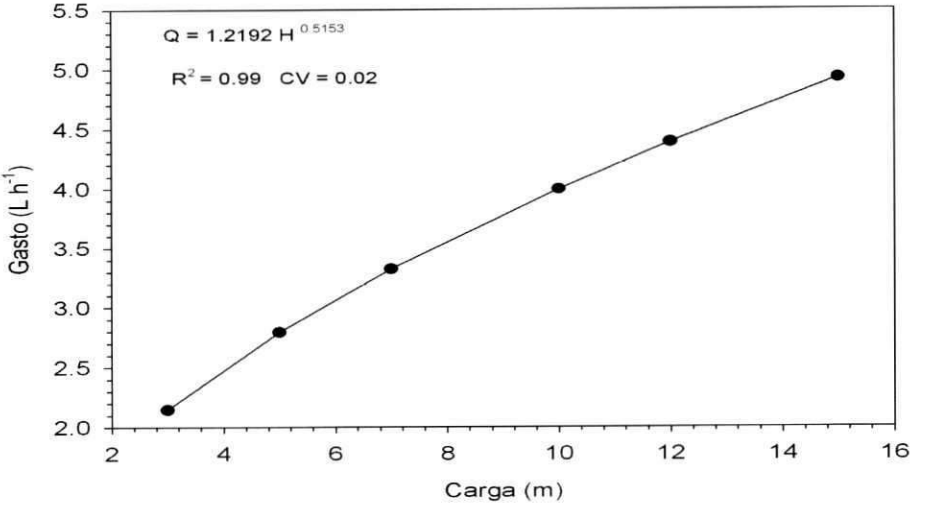


Figura 36. Estudio de un gotero de geometría rígida y de flujo turbulento. Tomada de Peña *et al.* (1979)

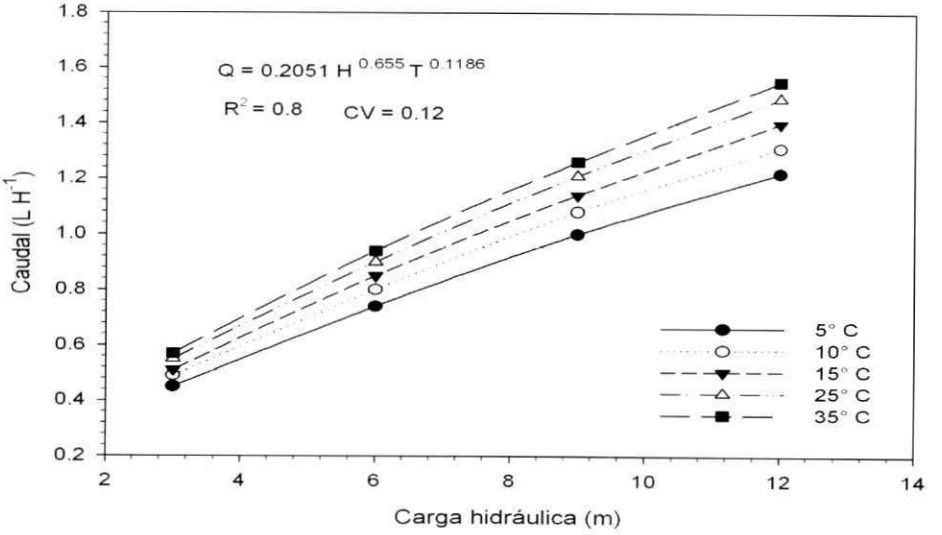


Figura 37. Estudio de una cinta de goteo (Román *et al.*, 2006)

Cuadro 3. Ejemplo de constantes y parámetros de regresión de un estudio sobre goteros (CENAMAR, 1982)

Gotero	K	X	Y	Z	R^2	CV
Microtubo 1 m (ϕ 1 mm)	1.5673	0.6634	0.1479		0.9910	0.03
Microtubo 2 m (ϕ 1 mm)	0.8466	0.6774	0.2075		0.9900	0.03
Microtubo 3 m (ϕ 1 mm)	0.5434	0.7386	0.2263		0.9920	0.02
Microtubo 4 m (ϕ 1 mm)	0.3071	0.7737	0.3027		0.9950	0.03
Microtubo (ϕ 1 mm)	1.1368	0.7130	0.2214	- 0.6367	0.9870	0.03
SYSAG	0.6434	0.5985	0.1201		0.9990	0.04
SYSAG - N	1.0521	0.5932	0.1041		0.9970	0.07
REX - 122 - L	0.2419	0.7950	0.1650		0.9980	0.02
REX - 122 - T	0.5962	0.5189			0.9970	0.02
REX - 124 - L	0.4393	0.6598	0.1996		1.0000	0.02
REX - 124 - T	1.2490	0.4907			0.9990	0.02
REX - 164 - L	0.4925	0.6689	0.1782		0.9900	0.03
REX - 164 - T	1.2192	0.5153			0.9990	0.02
* RYSE - 20	1.3287	0.5870	0.0906		0.9640	0.16
RAIN - BIRD	0.4925	0.6140	0.0653		0.9940	0.08
ISPSA	0.7525	0.6290	0.0613		0.9990	0.06
LEGO - 124 - T	1.3799	0.5106			0.9940	0.02
LEGO - 164 - T	1.2575	0.5017			0.9920	0.02
CINTA-GOTEO 16 mm	0.2051	0.6550	0.1186		0.8000	0.12

Funcionamiento hidráulico de líneas regantes y distribuidores

En todo sistema de riego por goteo la uniformidad del riego está relacionada con la variación de gasto de los goteros; esta variación se debe a:

- Pérdidas por fricción en líneas regantes
- Pérdidas por fricción en distribuidores
- Pérdidas localizadas en líneas regantes
- Pérdidas localizadas en distribuidores
- Carga de posición (topografía)
- Control de calidad de materias primas
- Procesos de fabricación
- Obstrucciones
- Régimen de flujo
- Temperatura
- Geometría del gotero
- Carga de Operación

El funcionamiento hidráulico de líneas regantes y distribuidores se ve afectado principalmente por dos factores:

- Pérdidas por fricción
- Pérdidas localizadas

Pérdidas por fricción (H_f)

Al utilizar tuberías como un medio para conducir un fluido a través de su longitud en metros (L), la velocidad de la corriente en la inmediata vecindad del contorno es nula; es decir, existe una resistencia que se opone al paso del fluido, la expresión obtenida por Darcy-Weisbach para calcular pérdidas de carga representa la disminución de la presión al avanzar el fluido y a la vez todo el proceso de movimiento afectado por la aceleración de la gravedad (g, m s^{-2}). La ecuación 4 se utiliza para el cálculo de las pérdidas por fricción en metros de columna de agua (m).

$$H_f = \frac{f L V^2}{2 g D} \qquad 4$$

La complicación al manejar la ecuación 4 se presenta al estimar el factor de fricción " f " para lo cual existen dos métodos:

- Auxiliándose del diagrama de Moody en donde es necesario considerar ciertos datos como la velocidad del fluido (V) en m s^{-1}, diámetro interior de la tubería (D) en metros, viscosidad cinemática (m^2 s^{-1}) y rugosidad de la tubería de longitud (L) en m.

- El otro método consiste en calcularlo directamente por algún proceso iterativo de ecuaciones empíricas.

Sin embargo, existen relaciones empíricas que sólo toman en cuenta el efecto de la rugosidad, como son la fórmula de Hazen & Williams y Manning, que cuando se utilizan en algunos problemas específicos de la conducción de agua exclusivamente se obtiene una aproximación bastante buena al fenómeno en estudio.

Tuberías con salidas múltiples

En el caso de tuberías con salidas múltiples, en el CENID-RASPA se ha manejado la fórmula de Manning para obtener las pérdidas de carga por fricción.

$$H_f = \frac{10.29\ C^2\ L\ Q^2}{D^{16/3}} \qquad 5$$

Donde H_f representa las pérdidas de carga por fricción en metros de columna de agua (m), en la longitud (L) en metros de tubería con diámetro interior de paso (D) en m^2, por donde circula un caudal en $m^3\ s^{-1}$, y C es el coeficiente de rugosidad del material del tubo (adimensional). Experimentalmente se ha logrado determinar el valor de C para tuberías de diferentes diámetros. El Cuadro 4 muestra los coeficientes de fricción para diferentes diámetros de tuberías lisas de plástico y de aluminio. Se utiliza un valor promedio para estos materiales de 0.008; en los libros tradicionales de hidráulica se pueden consultar los valores para otro tipo de materiales.

Cuadro 4. Coeficiente de rugosidad de Manning (C) para tuberías lisas (Peña *et al.*, 1979)

Diámetro de tubería (mm)	Coeficiente de rugosidad (adim)	Coeficiente de variación (%)
10.0	0.007551	0.038
20.9	0.008347	0.028
26.7	0.007934	0.052
35.1	0.008203	0.019
40.9	0.007687	0.051
Promedio	C = 0.007944	0.037

Pérdidas localizadas

Las pérdidas localizadas en los sistemas de riego por goteo son debidas a obstáculos que generan cambios en el área de paso del conducto y/o cambios de dirección. Los obstáculos que se presentan en los sistemas de riego por goteo pueden ser: filtros, dosificadores de soluciones, válvulas, medidores de gasto, manómetros, reducciones, codos, tes, conexión de goteros, etc. Para el diseño de este tipo de sistemas es necesario conocer las pérdidas de carga localizadas, por lo tanto se requiere conocer los coeficientes de pérdidas de energía localizada. Estas se calculan con la fórmula universal mostrada como ecuación 6.

$$HL = K\frac{V^2}{2g} \qquad 6$$

Funcionamiento hidráulico de accesorios y dispositivos

En un sistema de riego por goteo las pérdidas localizadas debido al tipo de conexión del gotero pueden ser de magnitud mayor que las pérdidas por fricción en la línea regante. Un gotero puede estar conectado "en la línea" y "sobre la línea"; en la primera el flujo sufre una contracción-expansión y en la segunda el flujo sufre una desviación en sus líneas de corriente provocando ambos grandes pérdidas de presión. Este fenómeno influye significativamente en el número de goteros que se pueden cargar en la línea regante. La pérdida de carga localizada de un gotero en una línea regante puede calcularse con la Ecuación 6a.

$$HL = \frac{K_g\ q_m^2}{2g\ A^2} \qquad 6a$$

Donde HL es la pérdida de carga localizada en m, K_g es el coeficiente de pérdida de carga localizada por conexión del gotero (adim), q^2_mes el gasto medio del gotero a la segunda potencia ($m^3m^3s^{-1}$), g es la aceleración de la gravedad estándar al nivel del mar en m s^{-2} (9.81), A^2 es el área de flujo transversal que pasa por el gotero a la tubería en m^2 o el área de la tubería que se le presenta una obstrucción al flujo en el caso de "sobre la línea". El CENID-RASPA determinó experimentalmente los coeficientes de pérdida de carga localizada para distintas conexiones de goteros (K_g). Esta información se presenta en el Cuadro 5, y el significado de sus parámetros se define a continuación:

D es la representación del diámetro del tubo de la línea regante (m), N corresponde a el número de goteros por línea regante, Ht es la pérdida de carga total (m) para N goteros conectados, q_m es el gasto medio proporcionado por el gotero y que se obtiene de la suma del gasto del primer y último gotero dividido entre dos ($L\ h^{-1}$), K_g es el coeficiente de pérdida de

carga localizada por conexión de goteros, $\overline{K}_g$ es el valor medio del parámetro K_g. El Cuadro 5 muestra la tendencia de aumentar el valor de K_g conforme disminuye el número de goteros.

El efecto de las pérdidas de carga localizadas de los goteros "en la línea" es que producen líneas regantes más cortas para una pérdida de carga permisible y, por consiguiente, se tienen unidades de riego más pequeñas y un incremento económico ya que los costos fijos de la unidad como válvulas de control y gasto se prorratean en un número menor de puntos de emisión. Para el caso de goteo-cintilla se usa el coeficiente en línea de 16 mm.

Cuadro 5. Coeficientes de pérdidas de carga localizada para distintas conexiones de los goteros (Peña *et al.*, 1979)

Gotero	En línea				En línea				Sobre la línea			
D	12 mm				16 mm				16 mm			
N	100	80	60	40	100	80	60	40	100	80	60	40
Ht	2.40	1.46	0.69	0.24	3.06	1.93	0.93	0.32	1.06	0.55	0.27	0.07
$\bar{q}$	1.84	1.94	2.01	2.06	3.66	3.87	4.07	4.21	3.64	3.79	3.90	3.97
K_g	1.45	1.67	1.80	2.17	1.73	2.13	2.25	2.58	0.14	0.15	0.28	
$\bar{K}_g$	1.78				2.17				0.19			

La utilización de dispositivos tales como el conector te o silleta en un distribuidor para la conexión de una línea regante, causa grandes pérdidas de carga ya que al pasar por éste el flujo se contrae debido a que el diámetro de este dispositivo es significativamente menor que el de la línea regante. Otro efecto producido por este dispositivo es que al pasar el flujo a lo largo del distribuidor sufre una desviación causada por la punta final del conector, lo cual origina también pérdidas de presión. La pérdida de carga localizada por el conector citado está dada por la ecuación 6b.

$$HL = \frac{K_d Q^2}{2gA^2} \qquad 6b$$

Donde HL es la pérdida de carga localizada (m), K_d es el coeficiente de pérdida localizada (adimensional), Q se refiere al gasto que pasa a través del conector ($m^3 s^{-1}$), g ya fue definido, A es el área de paso del flujo del conector (m^2).

El Cuadro 6 presenta distintos valores de K_d de acuerdo al tamaño del conector y su respectiva área de flujo transversal definida por su diámetro interno (DI). Los valores de K_d se obtuvieron experimentalmente para diferentes valores de longitud (L), ya que dicha variación introduce cambios en el gasto debido a las pérdidas por fricción. La pérdida de carga HL varía al disminuir la longitud con el consiguiente aumento en el gasto (Q). Este cuadro muestra que al reducir el diámetro interior de flujo (DI) se incrementa el valor del coeficiente de pérdidas de carga (K_d); esto significa una mayor pérdida de carga hidráulica (HL) en la tubería de distribución y una disminución del gasto ($L s^{-1}$).

Cuadro 6. Valores del coeficiente de carga localizadas (K_d) de las conexiones te o silletas más comunes (Peña *et al.*, 1979)

Tamaño(mm)	52.5-10 y 40.9 - 10				40.9 - 14			
DI (mm)	4.65				5.5			
L (m)	70	50	40	30	138.5	103.5	68.5	33.5
H (m)	3.18	3.89	4.48	5.31	3.08	3.94	5.32	7.94
Q ($L s^{-1}$)	0.0849	0.1033	0.1128	0.1282	0.1417	0.1614	0.1883	0.2341
K_d	2.30	2.06	1.99	1.83	1.70	1.67	1.66	1.66
$\bar{K}_d$	2.045				1.673			

Funcionamiento hidráulico del cabezal de control

A poca distancia de la fuente de abastecimiento se sitúa el cabezal de descarga o control, elemento fundamental para llevar a cabo la medi-

ción del flujo, la filtración y el inyectado de nutrimentos y mejoradores. Esta parte del sistema puede estar formada de simples dispositivos hasta de los más sofisticados, dependiendo de la magnitud del área a irrigar, topografía, cultivos a irrigar y la calidad del agua de riego.

Sistema de filtrado

Los filtros que se utilizan en los sistemas de riego localizados son de los siguientes tipos: filtro desarenador (Figura 17), malla de acero inoxidable (Figura 18) y de arena sílica (Figura 19). Los tres tipos de filtros se describieron en una sección anterior, por lo que aquí se describe su efecto hidráulico en el sistema. El flujo de agua se introduce tangencialmente al cuerpo del filtro permitiendo la precipitación de las partículas pesadas antes de llegar al cartucho filtrante y minimizando así la caída de presión. Debido a la cantidad de filtros y capacidad de mallas existentes, esta pérdida de carga se considera de poca magnitud y es función de la capacidad del flujo (de 5 a 16 L s^{-1} en forma independiente y mayor de 16 L s^{-1} colocados en batería). Una representación gráfica de la pérdida de carga para filtros de hidrociclón y malla, se muestra en la Figura 38. Tanto para el filtro hidrociclón como para el de malla, la pérdida de carga localizada debido a su conexión es proporcionada por el fabricante.

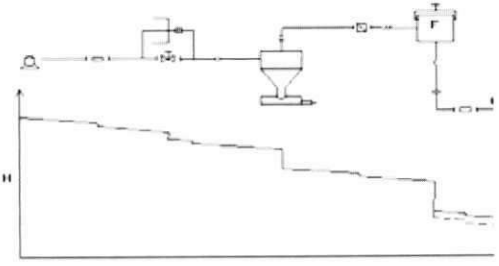


Figura 38. Plano piezométrico de un cabezal de control donde, H es la carga hidráulica, F el filtro de malla y antes de él, el filtro Hidrociclón

En cuanto a los filtros de arena, pueden utilizarse en forma independiente o en batería y esto es función de su capacidad de caudal para su

operación y varía en el rango de 11 a 48 L s^{-1}, su presión de funcionamiento fluctúa entre 7 y 10 kg cm^{-2}. No se tienen estudios del funcionamiento hidráulico de los filtros de arena, por lo que se desconoce la magnitud de la pérdida de carga localizada que origina, quedando esto en manos de las recomendaciones del fabricante.

Dosificador de fertilizantes

Hay dos formas de inyectar fertilizantes en los sistemas de riego por goteo:

-Dosificador de tanque hermético.
-Dosificador de tanque abierto.

La operación puede implicar un tanque presurizado o hidroneumático, en donde se disuelve el fertilizante por un torrente de agua que se genera aprovechando un gradiente hidráulico en la conducción del flujo de agua en el cabezal (Figura 11) o realizar la inyección de la solución fertilizadora por medio de una pequeña bomba independiente (Figura 12). En ambos casos después de llegar el fertilizante al interior de las tuberías se mezcla con la turbulencia del líquido, lo que resulta que en una pequeña distancia se tenga una solución homogénea. En la operación de la fertilización se utilizan tanques móviles o estacionarios. En los primercs se prefieren los hidroneumáticos, ya que pueden fácilmente transportarse y adaptarse a las unidades de control de cada sector del sistema, permitiendo con ello gran flexibilidad en la inyección de fertilizantes. Los segundos, por requerir una bomba tendrían que incluir un motor el cual por razones de transporte a los diferentes sectores, es conveniente elegir uno de combustión interna. Este tipo de tanques utilizan fertilizantes predisueltos y su ventaja principal es poder regular su dosificación con mayor precisión.

Dosificador de tanque hermético.

El dosificador puede estar formado de uno o dos tanques con tapa

hermética conectados en serie con un medidor de flujo colocado en el cuerpo de un "by-pass" aguas arriba del filtro. Constituye un método de dosificación de mezclas, económico funcional y de fácil operación. El dispositivo "by-pass" que se utiliza es un juego de válvulas que provoca un gradiente hidráulico en una bifurcación de la tubería (hacia el tanque fertilizador en el cual un torrente de agua forma la solución fertilizadora) donde vuelve a ser conectada a la tubería que se dirige a la unidad de filtración (Figura 11). Desde el punto de vista hidráulico la conexión del dosificador ocasiona una pérdida de carga. En el CENID-RASPA se determinó que para el tanque fertilizador con capacidad de 50 L y para gastos de operación de 1 a 15 L min^{-1}, la pérdida de carga máxima es de 20 cm.

Dosificador de tanque abierto

Este dosificador desde el punto de vista del funcionamiento hidráulico no ocasiona ninguna pérdida de carga, ya que el flujo del sistema no pasa a través de él.

Selección del equipo de bombeo

Para seleccionar adecuadamente la bomba centrífuga del sistema de riego se recomienda hacer uso de las curvas características proporcionadas por los fabricantes a fin de obtener la información técnica respecto a la eficiencia de bombeo, la potencia requerida, tamaño, velocidad de giro, marca y modelo, así como el gasto y carga de bombeo óptimos. Otro criterio para seleccionar la bomba es utilizar las fórmulas donde sólo se calcula la potencia que se requiere en la flecha de la bomba y la potencia del motor. Para el cálculo de éste parámetro se propone la Ecuación 7.

$$POT_B = \frac{Q_B * HT_B}{\eta_b * 76} = HP \qquad 7$$

Donde POT_B es el cálculo de la potencia que se requiere para la flecha de la bomba, Q_B es el gasto de bombeo y es igual al gasto disponible en L s^{-1}, HT_B es la carga total dinámica o carga de bombeo que se

origina de HT_B=Ho+Htc+H_{CC}+T (m), de la que Ho es la carga de operación de la unidad de riego, Htc son las pérdidas de carga total de conducción, H_{CC} representan las pérdidas de carga del cabezal de control, T es el desnivel topográfico, n_b es la eficiencia de la bomba (adimensional), 76 es un factor de conversión para las unidades caballos de potencia (HP), la Ecuación 7 es válida sólo para agua como el fluido a bombear.

El valor de la eficiencia de bombeo (n) se aproxima a la eficiencia mecánica (n_m), y está en función del gasto bombeado [$n_m = f(Q)$]. Al respecto, De Parres (1977) presenta un análisis gráfico donde se obtienen valores medios y de límite superior e inferior de las eficiencias mecánicas esperadas en función del caudal suministrado. Tal análisis comprende el muestreo de bombas de distintos fabricantes que se encuentran en el mercado, de donde se generó la Ecuación 8 y en la cual se estima el valor de eficiencia de cualquier bomba en función del gasto de bombeo.

$$\eta_m = \frac{1}{0.013274667 + \frac{0.039597151}{Q}} \qquad 8$$

$$R^2 = 0.99$$

Donde $n_m \approx n_b$ (%), en la Ecuación 7 se procesa como decimal, Q es el caudal (L s^{-1}), la Ecuación 8 se ajustó para un rango de 5–700 L s^{-1}, en bombas centrífugas horizontales.

Cálculo de la potencia del motor

$$Pot_m = HP = \left(\frac{Pot_B}{\eta_{mot}}\right) \qquad 9$$

Donde n_{mot} es la eficiencia del motor, en por ciento, y se procesa en decimal.

Para motores nuevos de combustión interna, algunos fabricantes recomiendan considerar un 85 por ciento de eficiencia del motor. Para el caso de motores eléctricos, lo proporciona el motor en su placa o se utiliza el Cuadro 7.

Al entender el funcionamiento hidráulico de un sistema de riego por goteo se conoce qué se puede esperar de él para programar la evaluación, conservación e instalación. Los estudios del funcionamiento hidráulico basados en pruebas de campo y trabajos de investigación son la base del diseño de sistemas de riego por goteo.

DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE RIEGO POR GOTEO

Introducción al diseño

Uno de los pasos para proyectar adecuadamente un sistema de riego por goteo es el diseño del mismo. Para diseñar han sido propuestas varias metodologías que no involucran necesariamente los mismos factores o parámetros.

En el CENID-RASPA se ha trabajado desde hace algunos años con riego por goteo, obteniéndose excelente respuesta en diversos cultivos, lo que motivó para estudiar más a fondo este sistema de riego. Así, en experimentos realizados en este centro indican que la formación del bulbo de humedecimiento en el suelo regado por goteo está regido por los fenómenos físicos de capilaridad e infiltración.

Cuadro 7. Eficiencia de motores eléctricos (%) más comunes de 60 ciclos (Román *et al.*, 2004)

Potencia del motor (HP)	Motor			
	Monofásico (RPM)		Trifásico (RPM)	
	1750	3450	1750	3450
1/4		63		
1/3		68		
1/2		69		
3/4		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	

Dentro del criterio tradicional de aplicación del agua con riego por goteo para determinar el cuánto y cómo regar se considera lo siguiente:

Cuánto regar:

- Se puede utilizar el uso consuntivo del cultivo o un porcentaje de la evapotranspiración de referencia.

- Volumen por aplicar al cultivo.

Para determinar el volumen es necesario una lámina y un área; la lámina se obtiene con base en lo citado en el anterior inciso. Para determinar el área a irrigar en cultivos anuales (hortalizas) se considera como área de influencia la separación entre plantas y su profundidad radical con lo cual se obtienen las separaciones entre goteros y líneas regante. Para establecer el área en árboles frutales se consideran cuatro criterios:

- El área que ocupan las raíces

- Proyección de la sombra del árbol

- Área de terreno que le corresponde a cada árbol, según su espaciamiento dentro de la superficie de plantación

-Criterio del área equivalente

Los primeros dos criterios presentan una serie de inconvenientes si se siguen fielmente, por lo que se recomienda hacer algunas consideraciones lógicas en el caso que se utilicen.

El criterio del área equivalente está basado en áreas que corresponden a la superficie transpirante de las hojas de la planta. Estas áreas corresponden a los árboles que han llegado a su pleno desarrollo. Considerando que el medio donde se desarrollan los cultivos es siempre variable, los valores de área equivalente deben tomarse como aproximados, por tal razón, este criterio es el determinante para el diseño, sin embargo, durante la operación del sistema de riego por goteo en máxima demanda de agua por el cultivo se obtiene la lámina a reponer sobre el área de plantación aplicando el volumen de agua correspondiente en el área equivalente.

En el Cuadro 8 se presentan los porcentajes (del volumen de agua correspondiente al área equivalente máxima) aplicados a las áreas de influencia, según el desarrollo de las plantas.

Para determinar el área equivalente es necesario clasificar los frutales como sigue:

Árboles de área chica

Comprende frutales como dátil, papayo, plátano y similares; se les considera un área de influencia de 9 a 12 m^2.

Árboles de áreas medianas

Comprende frutales como: manzano, durazno, peral, chabacano, cítricos y similares; se les considera una área equivalente de 20 a 30 m^2 por árbol.

Árboles de superficies grandes

En este grupo están considerados el nogal, olivo, aguacate, higo, mango, tamarindo y similares. Se les considera un área entre 40 y 60 m^2. Se recomienda ver la sección de requerimiento de riego más adelante.

Cuadro 8. Porcentajes aplicados a las áreas de influencia equivalentes según el desarrollo vegetativo de los árboles

Año	Árboles de área Chica	Árboles de área mediana	Árboles de área grande
1	33	33	25
2	66	66	50
3	100	66	50
4	-	100	75
5	-	-	75

Cómo regar

Para resolver el cómo regar con goteo se debe establecer la forma de distribuir los goteros considerando las características de plantación:

Cultivos anuales

- Usar una línea regante (goteros a 50 cm como máximo) en cada dos hileras de plantas.

- Se recomienda que el gasto de goteros no sobrepase los 2 L h^{-1}.

-La separación entre regantes dependerá del cultivo que se trate.

Cultivos perennes

- Usar una o dos líneas regantes (goteros a 1.0 m como máximo) por hilera de árboles.

- Usar goteros con descarga no menor de 4 L h^{-1}.

- La colocación del gotero más cercano al árbol debe estar a una distancia no menor de 25 cm.

- Para el caso de árboles de área chica se deben usar emisores con tres goteros por árbol colocados en línea.

- Para árboles de área mediana usar en el emisor entre cuatro y seis goteros por árbol.

- Para árboles de área grande el emisor debe estar formado con siete y ocho goteros por árbol.

Prerrequisitos de diseño

Antes de iniciar un proyecto de diseño es necesario contar con ciertos requisitos que indiquen las características principales de la zona donde se va a establecer el sistema de riego, ya que el diseño basado en suposiciones o aproximaciones repercute en la eficiencia, uniformidad de riego y en la inversión para adquirir el equipo.

Terreno

Plano topográfico

Es necesario un plano donde las curvas a nivel o cotas topográficas se encuentren a equidistancias de 10 cm y en la escala que se juzgue conveniente, considerando la superficie de siembra y el cultivo que se va a implantar. Algunas especificaciones se presentan en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Escala sugerida para el diseño conforme a la superficie de riego por goteo

Superficie (ha)	Escala
≤25	1:500
26-50	1:1000
51-250	1:5000
251-500	1:8000

- Características físicas más importantes para el diseño:
  Textura (retención de humedad del suelo).
  Curva de capilaridad (área de influencia del gotero).
  CC, PMP, Da (capacidad de retención).
  Infiltración básica (Ib).

- Características químicas.
  Fertilidad (Programa de fertilización).
  pH (Disponibilidad de nutrimentos aplicados al suelo).

2. Fuente de abastecimiento

Localización

Es importante localizar la fuente de abastecimiento en el plano pues de ahí parte la tubería de conducción de agua hasta las unidades de riego.

Gasto disponible

El dato de gasto disponible determinará, al relacionarlo con otros parámetros, el área máxima a regar.

Calidad del agua

De las características del agua de riego va a depender la selección del tipo de gotero y sistema filtrante. En el caso de contener sólidos suspendidos y/o en solución (contaminantes orgánicos e inorgánicos) se deben conocer perfectamente sus características para poder seleccionar correctamente el sistema de filtrado y el tratamiento del agua adecuado para evitar problemas de obstrucciones, tanto en la tubería como en las demás partes del sistema.

Los parámetros de mayor importancia son los siguientes:

- Conductividad eléctrica. Directamente relacionada con el grado de salinidad.

- Relación de adsorción de sodio. Indica el riesgo de alcalinización.

- Contenidos de carbonatos y bicarbonatos. Provocan problemas de taponamientos por incrustaciones al precipitarse dentro del sistema.

Clima

Evapotranspiración de referencia, evaporación y precipitación pluvial.

Para diseñar el sistema de riego es necesario conocer el volumen de agua crítico que requiere la planta; para determinar este dato se debe determinar la evapotranspiración de referencia (ETr) o en su defecto estimarla por medio de registros históricos de evaporación para la zona donde se va a establecer el sistema.

Una vez que se ha diseñado, los datos de evapotranspiración de referencia, evaporación y precipitación deberán ser tomados directa y diariamente en la zona de riego para determinar la lámina periódica.

Clasificación climática

Es importante clasificar el clima de la zona de riego para establecer el programa de cultivos con el fin de conocer el grado de adaptabilidad para las condiciones climatológicas predominantes.

Para el sistema de riego por goteo es conveniente inclinarse por los cultivos que además de adaptarse a las condiciones de la zona sean lo suficientemente redituables para solventar el alto costo de la inversión.

Temperatura

Es importante tener los datos de la temperatura ambiental, ya que en el caso de utilizar goteros de flujo laminar su comportamiento hidráulico se ve afectado por este factor, debiendo tomarse en cuenta dentro de las consideraciones de diseño.

Cultivo

Datos agronómicos. Los de más utilidad son los siguientes:

- Agronómicos: Tipo de cultivo
  Variedad
  Edad
  Ciclo vegetativo
  Requerimientos nutricionales

-Para Diseño:
Separación entre plantas
Separación entre hileras
Profundidad radical
Valores de KC para estimar su evapotranspiración máxima (ETm) con la ETr o con el % de la Evaporación.

Infraestructura Disponible

En infraestructura se consideran las obras hidráulicas existentes, caminos o carreteras cercanas a la zona de riego, tipo de energía de que se dispone (para hacer la selección de la motobomba), y la existencia en la zona de riego de algún motor o bomba que pudiera utilizarse para hacer funcionar el sistema (es necesario conocer las características del equipo existente para adaptar las necesidades de potencia requeridas por la unidad de riego).

Diseño hidráulico del sistema de riego por goteo

En la literatura se encuentran dos criterios de diseño que en principio se basan en aceptar una variación en el gasto de emisión. El primero que se manejará aquí, asume que la variación aceptable de los gastos no debe ser mayor del 10 % del gasto promedio comparando el emisor más favorecido q_o con el menos favorecido q_f, y que la variación solamente se debe al efecto de carga hidráulica por efecto de presión, ejercido por la bomba y las variaciones topográficas. El segundo considera que la variación de gasto debe evaluarse según el coeficiente de uniformidad, ya que considera además de los efectos anteriores, la variación natural del emisor, debido a su fabricación que deberá tener un coeficiente de variabilidad o de uniformidad.

Para ejemplificar la aplicación de los principios básicos del diseño de sistemas de riego por goteo se procederá de acuerdo a la metodología empleada en el CENID-RASPA para 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.

Diseño de la unidad de riego

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

Que sea hidráulicamente controlable.

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 a presión se acepta una diferencia máxima en gasto entre emisores de l0 por ciento debido a una variación de

carga hidráulica de 20 por ciento; esta diferencia se representa de la siguiente forma:

$$\frac{q_f}{q_o} = 0.9 \qquad 10$$

Donde $\frac{q_f}{q_o}$ es el cociente del gasto entre el último y el primer emisor.

De acuerdo a la Ecuación 3 del gotero y a la relación de gasto, se deduce la igualdad 11:

$$\frac{q_f}{q_o} = \frac{K H_f^x}{K H_o^x} = 0.9 \qquad 11$$

Sustituyendo y eliminando términos queda la Función 12.

$$H_f = (0.9)^{1/x} H_o \qquad 12$$

Donde de manera análoga a la Ecuación 10, H_f representa la carga en el último gotero y H_o la carga en el primero. La variación de carga entre el primero y último emisor se define por la relación 13.

$$\Delta H = H_o - H_f \qquad 13$$

Donde Δ H representa la pérdida de carga permitida para obtener la diferencia de carga que se desea dentro de la unidad de riego (m). Al sustituir H_f de la Ecuación 12 en la expresión 13 se obtiene la relación 14.

$$\Delta H = (1 - 0.9^{1/x}) H_o \qquad 14$$

Al observar la Ecuación 14 se tiene como incógnita H_o que representa la presión de operación, es decir, la que se debe aplicar al inicio de la unidad para asegurar el gasto medio ($\overline{q}$) del emisor que se aplica en la unidad de riego. El valor del $\overline{q}$ se obtiene mediante el siguiente análisis algebraico reducido a su mínima expresión como Ecuación 15.

$$\bar{q} = \frac{q_0 + q_f}{2}$$

$$\ln \bar{q} = \frac{\ln q_0 + \ln q_f}{2}$$

$$\ln \bar{q} = 2 \ln (q_0\, q_f)$$

$$\ln \bar{q} = \ln (q_0\, q_f)^{1/2} \qquad 15$$

como $q_f = 0.9\, q_0$ y $q = KH^x$

entonces :

$$\ln \bar{q} = \ln (KH_0^x\, KH_0^x\, (0.9))^{1/2}$$

$$\bar{q} = KH_0^x (0.9)^{1/2}$$

Ahora al despejar la presión de operación (H_o) de la Ecuación 15 se genera la expresión 16.

$$H_o = \left[\frac{q_m}{K (0.9)^{1/2}} \right]^{1/x} \qquad 16$$

Específicamente para el riego por goteo, un porcentaje de la pérdida de carga permisible ΔH se utilizará para la selección del diámetro de la línea regante y el restante se asignará para la selección del diámetro del distribuidor, ya que una unidad de riego por goteo se asume que consta de la tubería de distribución y los laterales.

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 perdidas de carga total con salidas múltiples (Ht), que es el caso de una línea regante en la metodología CENID-RASPA, se suman; las pérdidas de carga por fricción en la tubería con la expresión de Manning (Ecuación 5; se pueden utilizar otras como la de Darcy-Weisbach o Hazen-Williams) y las pérdidas de carga localizadas (H_L) con la Ecuación 6A. Para su cálculo se obtuvo la Ecuación 17 en forma simplificada (Peña *et al.* 1979):

$$Ht = \left[\frac{10.29\, C^2\, S}{D^{16/3}} + \frac{k_g}{2g\, A^2} \right] q_m^2 \sum_{i=1}^{N} i^2 \qquad 17$$

Donde N representa el número total de emisores en la línea regante.

La resolución de la sumatoria que aparece en la Ecuación 17 puede ser resuelta con la siguiente igualdad:

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

La igualdad de la sumatoria se sustituye en la Ecuación 17 y en la misma la Ht es igual al porcentaje de la pérdida de carga correspondiente a la línea regante, que permite una variación establecida en el gasto dentro de la unidad de riego, de tal manera que N queda como incógnita. Para solucionar la igualdad insertada en la Ecuación 17, se utilizan comúnmente tres métodos: el de tanteos con el coeficiente de salidas múltiples (CSM), el método de Newton-Ramphson, y el analítico utilizando una ecuación polinomial cúbica.

1. Coeficiente de Salidas Múltiples (CSM)

Esta forma de solución es por "tanteos" al usar el coeficiente de salidas múltiples (CSM) dado por la Ecuación 18.

$$CSM = \frac{\sum_{i=1}^{N} i^2}{N^3} \qquad 18$$

Al sustituir la sumatoria de la expresión 18 con su equivalente en la Ecuación 17 y despejando el número de salidas (N), se obtiene la Ecuación 19 (Peña *et al.*, 1979).

$$N = \left[\frac{Ht}{\left(\frac{10.29C^2S}{D^{16/3}} + \frac{K_g}{2gA^2} \right) q_m^2 CSM} \right]^{1/3} \qquad 19$$

Como se citó anteriormente, debido a que el CSM depende de N para encontrar la solución, es necesario hacer iteraciones con ayuda del Cuadro 10.

Cuadro 10. Coeficientes de salidas múltiples en tuberías que afecta el producto de pérdidas de carga total (Peña *et al.*, 1979)

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

2.- Método de Newton-Ramphson

El método numérico de Newton-Ramphson, se utiliza para encontrar las raíces de una ecuación polinomial. Encontrar la raíz de una función significa encontrar el valor de la variable dependiente, donde la expresión se anula, el principio está basado en la serie de Taylor para la primera derivada y cuyo algoritmo de solución es mostrado a continuación en la Ecuación 20.

$$f'(x_i) = \frac{f(x_i) - 0}{x_i - x_{i+1}} \qquad 20$$

Donde si se asume un valor inicial (x_i), la siguiente aproximación se puede obtener con la Ecuación 21.

$$x_{i+1} = x_i - \frac{f(x_i)}{f'(x_i)} \qquad 21$$

El procedimiento termina cuando se cumple una precisión aceptable, esta precisión generalmente se expresa en términos porcentuales de la convergencia de la raíz (Ecuación 22).

$$\|\varepsilon_a\| = \left| \frac{x_{i+1} - x_i}{x_{i+1}} * 100 \right| \qquad 22$$

o también en forma absoluta de la desviación del valor de la función que deberá ser cero.

$$|\varepsilon| = |f(x_i)| = 0.0001 \text{ por ejemplo.}$$

3.-Método analítico de la polinomial de tercer grado

Si se considera la siguiente forma de la ecuación cúbica (Ecuación 23):

$$X^3 + a_1 * X^2 + a_2 * X + a_3 = 0 \qquad 23$$

Para el caso de la pérdida de carga total de una tubería de salidas múltiples desarrollando la ecuación 17 sustituyendo el valor de la sumatoria se obtiene la ecuación 24.

$$H_T = \left[\frac{10.29 * n^2 * s * q^2}{D^{\frac{16}{3}}} + \frac{k * q^2}{2 * g * A^2} \right] * \frac{2 * N^3 + 3 * N^2 + N}{6} \qquad 24$$

Si se asume que el terreno es plano y al igualar a cero la expresión 24 en términos de su función algebraica se obtiene:

$$F(N) = 2 * N^3 + 3 * N^2 + N - \frac{6 * H_T}{\left[\frac{10.29 * n^2 * q^2 * s}{D^{\frac{16}{3}}} + \frac{k * q^2}{2 * g * A^2} \right]} = 0.0$$

Para ordenar el grado de la polinomial conforme a la Ecuación 23, se divide entre dos toda la función obteniéndose por consecuencia:

$$F(N) = N^3 + \frac{3}{2} * N^2 + \frac{1}{2} * N - \frac{3 * H_T}{\left[\frac{10.29 * n^2 * q^2 * s}{D^{\frac{16}{3}}} + \frac{k * q^2}{2 * g * A^2} \right]} = 0.0$$

Donde:

$$a_1 = 3/2 \quad a_2 = 1/2 \quad a_3 = \left\{ \frac{-3 * H_T}{\left[\frac{10.29 * n^2 * q^2 * s}{D^{\frac{16}{3}}} + \frac{k * q^2}{2 * g * A^2} \right]} \right\}$$

Para la solución se pueden calcular variables auxiliares, las cuales son (Ecuaciones 25, 26, 27, 28, 29):

$$Q = \frac{3 * a_1 - a_1^2}{9} = -\frac{1}{4} \qquad 25$$

$$R = \frac{9 * a_1 * a_2 - 27 * a_3 - 2 * a_1^3}{54} \qquad 26$$

$$Z = \sqrt[3]{R + \sqrt{Q^3 + R^2}} = \sqrt[3]{\frac{a_3}{2} + \sqrt{\frac{-1}{1728} - \left(\frac{a_3}{2}\right)^2}} \qquad 27$$

$$T = \sqrt{\frac{a_3}{2} - \sqrt{\frac{1}{1728} + \left(\frac{-a_3}{2}\right)^2}} \qquad 28$$

$$D = Q^3 + R^2 \qquad 29$$

El parámetro D de la Ecuación 29 se conoce como "discriminante", el cual para valores reales de tuberías con salidas múltiples resulta mayor de cero; por lo que se puede concluir que tiene solamente una variable real, la cual se calcula como la Ecuación 30:

$$N = Z + T - \frac{1}{3} * a_1 = Z + T - \frac{1}{2} \qquad 30$$

Diseño del distribuidor

El diseño del distribuidor es análogo al de las líneas regantes haciendo los ajustes apropiados. Así por ejemplo, el número de líneas regantes que debe tener la tubería de distribución se calcula de manera análoga al número de emisores. Algunas diferencias de variables son:

K_g = Coeficiente de pérdida de carga localizada ocasionada por conexión de la tubería; $q_{m\,R} = N q_m$ Si el distribuidor tiene líneas regante en un sólo lado; $_R = 2N$ = 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.

Tamaño y forma de la unidad de riego

En un sistema de riego por goteo en plano la pérdida de carga (Ht) 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, gasto del gotero, espaciamiento entre plantas e hileras y diámetros del distribuidor y de las 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 del distribuidor y regantes y el porcentaje de pérdida de carga en la línea regante.

Existen dos criterios para seleccionar el tamaño y la 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 se instalan dispositivos para controlar la presión y el gasto, los cuales se incluyen en el diseño de la conducción debido a que la selección de estos afecta el costo del equipo y 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), (Burt y Styles, 1994).

Diseño de la tubería de conducción

Trazo de la línea de conducción

Estas tuberías son las de mayor diámetro en todo el sistema, por lo que se requiere que sus longitudes sean lo más cortas posible por esta razón es deseable que a la salida de la fuente de abastecimiento se derive el gasto total en un mayor número de ramificaciones, de tal manera que se disminuya su diámetro en lo técnicamente posible. En los sistemas colectivos de riego por goteo donde está compuesta de varias unidades de riego dispersas, el diseño de la tubería de conducción más económica se expone en la metodología de diseño de Peña *et al.* (1978), por lo que se presenta en este capítulo. Para diseñar la línea de conducción se siguen dos criterios: diseño más corto o bien, el más económico.

Diseño más corto

Bajo el supuesto que todas las tuberías tienen el mismo diámetro, 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; enseguida se expone el procedimiento ejemplificado para el caso de la unión de todos los puntos de una red (Figura 39).

Se tiene un punto cualquiera A como origen, y con el punto más próximo a él, el punto B se traza la recta A-B. Se Añade el punto C, que es el siguiente

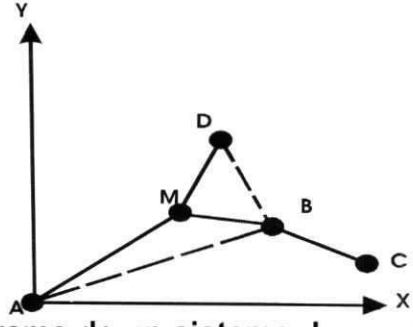


Figura 39 Diagrama de un sistema de conducción con un recorrido corto de la tubería

más próximo uniendo B-C. Como el ángulo ABC>120°, el trazado puede ser provisionalmente válido. El punto siguiente más próximo a los ya unidos es el D, se une B con D y resulta que el ángulo ABD es menor de l20° y por lo tanto, el trazado no es útil, siendo preciso aplicar un trazado en horquilla a los puntos A, B y D. Al llegar al punto M se debe asegurar que el nuevo ángulo MBC > 120°.

Diseño más económico

También se puede realizar un planteamiento analítico para buscar el trazo más económico. Esto se puede ilustrar con un ejemplo suponiendo únicamente los puntos **A B D** de la Figura 39. En dicha figura 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 (Cuadro 11). Asimismo, se conocen los costos unitarios de cada sección de la red (Cuadro 12).

Cuadro 11. Distancias en metros a los puntos de la red (ABD) de la Figura 39

Vértice	X (m)	Y (m)
1 o A	$X_1 = 0$	Y1 = 0
Bifurcación (M)	X = ?	Y = ?
2 o D	$X_2 = 200$	$Y_2 = 200$
3 o B	$X_3 = 400$	$Y_3 = 80$

Cuadro 12. Costo unitario de la tubería para la red (ABD) de la Figura 39

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. A su vez, cada longitud de sección estará en función de las coordenadas, es decir:

$$d_{1-M} = \left[(X_1 - X)^2 + (Y_1 - Y)^2 \right]^{0.5} \qquad 30a$$

$$d_{M-2} = \left[(X - X_2)^2 + (Y - Y_2)^2 \right]^{0.5} \qquad 30b$$

$$d_{M-3} = \left[(X - X_3)^2 + (Y - Y_3)^2 \right]^{0.5} \qquad 30c$$

De esta manera la función objetivo será:

$$\{C\}_{min} = d_{1-M} P_{1-M} + d_{M-2} P_{M-2} + d_{M-3} P_{M-3} \quad 31$$

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

El costo total es de $ 51,854.88 pesos

$X = X_M = 190.1$ m , $Y = Y_M = 147.8$ m :

Cuadro 13. Resultados de la red de tuberías ABD

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

Ejemplo de diseño de un sistema de riego por goteo en una huerta de nogal pecanero

Cuadro 14. Datos requeridos para realizar el ejemplo del diseño

1. Superficie	37, 440 m^2
2. Gasto disponible	12 L s^{-1}
3. Cultivo	Nogal
4. Profundidad a humedecer (Pr)	1.0 m
5. Plantación	Marco real
6. Separación entre plantas	12 m
7. Separación entre hileras	12 m
8. tipo de suelo	Migajon arcilloso
*Densidad aparente (Da)	1.32 g cm^{-3}
*Capacidad de campo (CC)	0.3148*
*Punto de marchitez permanente (PMP)	0.1318*
*Capilaridad (Ac) en el tiempo t	$Ac = 0.9093\ t^{0.4599}$
9. Calidad del agua	C_2S_1
10. Evaporación máxima diaria (Ev Máx. día^{-1})	11 mm
11. Coeficiente de Tanque estándar A (Kt)	0.8
12. Tiempo disponible de operación (To)	24 h
13. Ecuación del gotero	$Q = 0.5962H^{0.5189}$
14. Tipo de gotero	Rex-122t
15. Gasto del gotero	2 L h^{-1}
16. Eficiencia de riego	90 %
17. Velocidad de infiltración básica del suelo	1.0 cm h^{-1}

*Los porcentajes están con base en el peso de suelo seco.

Procedimiento de cálculo

Como se mencionó en el ¿cuánto regar?, se debe conocer el uso consuntivo máximo o la evaporación del tanque estándar tipo "A" durante el ciclo vegetativo del cultivo; además de considerar el área de influencia de cada planta, si se trata de un frutal. Con esta información se podrá obtener la demanda máxima (Dmáx).

Cálculos agronómicos

Volumen de suelo (Vs)

Área de plantación (12 x 12) = 144 m^2

Área propuesta a humedecer para bulbo de humedecimiento (Ap) 50 m^2 (criterio del área equivalente)

De donde: Vs = (Ap) (Pr) = (50 m^2) * (1.00 m) = 50 m^3

Volumen de agua (Va) necesaria para humedecer el volumen de suelo (Vs) a capacidad de campo (CC). No se considera precipitación efectiva. El contenido de humedad del suelo es el punto de marchitez permanente (PMP) con fines de diseño; en la práctica este valor corresponde al contenido de humedad presente antes de cada riego.

$$Va = \frac{(CC - PMP)Da * Vs}{Wa} = \frac{(0.3144 - 0.1318)\,1.32 * 50}{1} = 12.0516 m^3$$

Donde Va resulta en unidades de m^3, CC y PMP están en fracción decimal, Da en g cm^{-3}, Vs en m^3 y la densidad del agua (Wa) es considerada igual a 1 g cm^{-3}.

Demanda máxima de agua diaria por árbol (Dmaxdía^{-1}).

Dmaxdía^{-1} = (Kt) (Ev) (A_{total}*) = (0.8) * (0.011 m)* 144 m^2

Dmaxdía^{-1} = 1.2672 m^3

Dmaxdía^{-1} = 1267.2 L

Donde Kt representa un coeficiente de tanque evaporímetro (adim), Ev la evaporación (m) y A_{total} es el área de plantación.

La cantidad de agua para satisfacer la demanda máxima diaria en máxima producción y desarrollo vegetativo del cultivo de nogal debe estimarse conforme al área de plantación.

Caudal por árbol (Qe = gasto por emisor). Se denomina emisor al conjunto de goteros que son instalados por árbol.

$$Qe = \frac{D\max día^{-1}}{To} = \frac{1267.2\ L}{24\ h} = 52.8\ L h^{-1}$$

Tiempo (t) en que se humedece a capacidad de campo (CC) el volumen del suelo (Vs).

$$t = \frac{Va}{Qe} = \frac{(12.0156\ m^3)\left(\frac{1000\ L}{m^3}\right)}{(52.8\ L\ h^{-1})} = 227.57\ h$$

$$t = (227.57\ h)\left(60\frac{min}{h}\right) = 13,654\ min$$

Ascenso capilar (Ac en cm) en función del tiempo (t, min).

$$Ac = 0.9093\ t^{0.4599} = 0.9093\ (13,654)^{0.4599} = 72.53\ cm$$

Considerando este avance como el radio del área de humedecimiento del gotero (Ag), se tendrá:

$$Ag = \pi r^2 = 3.1416\left[\frac{72.53\ cm}{100\ \frac{cm}{m}}\right]^2 = 1.65\ m^2$$

Considerando un traslape de 10 por ciento en el área de humedecimiento entre goteros (Ag), el área efectiva por gotero (Aeg) será:

$$Aeg = (Ag)\ (0.90) = (1.65\ m^2)\ (0.90) = 1.49\ m^2$$

Número de goteros (Ng) necesarios para humedecer el área propuesta (Ap) es:

$$Ng = \frac{Ap}{Aeg} = \frac{50\ m^2}{1.49\ m^2} = 33.56 \approx 34$$

Gasto necesario por gotero (qg).

$$q_g = \frac{Qe}{Ng} = \frac{52.8\ L\,h^{-1}}{34} = 1.55\ L\,h^{-1}$$

Verificación del gasto del emisor (conjunto de goteros), para prevenir encharcamiento del área equivalente a regar (Peña, 1981).

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

Área irrigada por el emisor: 50 m^2 (500,000 cm^2)

Caudal del emisor: 52.8 L h^{-1} (52,800 $cm^3\ h^{-1}$)

Área de infiltración por el emisor (Aei):

$$Aei = \frac{Qe}{Ib} = \frac{52{,}800\ cm^3 h^{-1}}{1.0\ cm\,h^{-1}} = 52{,}800\ cm^2$$

Porcentaje de área encharcada (% Aech):

$$\%\ Aech = \frac{Aei}{Ap} \times 100\ \% = \frac{52{,}800\ cm^2}{500{,}000\ cm^2} \times 100\ \% = 10.6\ \%$$

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

Cálculo hidráulico

Presión de operación (Ho) de la unidad de riego (Ecuación 16).

$$Ho = \left(\frac{q_m}{K\,(0.9)^{1/2}} \right)^{1/x} = \left(\frac{1.55}{0.5962\ \ (0.9)^{1/2}} \right)^{1/\,0.5189} = 6.98\ m \cong 7$$

Donde Ho tiene unidades en metros de columna de agua (m), q_m es el gasto medio del emisor en L h^{-1}, K es el coeficiente de la ecuación del gotero (adimensional), x es el exponente de la ecuación del gotero (adimensional) y 0.9 es el coeficiente de uniformidad preestablecida de riego (adimensional).

Pérdida de carga permisible H en la unidad de riego (Ecuación 14).

$$\Delta H = \left[1 - 0.9^{\,1/x}\right] Ho = \left[1 - (0.9)^{\,1/0.5189}\right] * 7 = 1.29\ m$$

De acuerdo a la metodología recomendada por el CENID-RASPA, se debe dividir la DH entre un 25 por ciento para formar líneas regantes y un 75 por ciento para el distribuidor. Si HLr es la pérdida de carga permisible para la línea regante. El 25 por ciento sería HLr = (0.25) 1.29 = 0.32 m; Si HD es la pérdida de carga permisible para el distribuidor, el 75 por ciento de $_{\Delta}$H sería: HD = (0.75) 1.29 = 0.97 m.

Unidad de riego

Número de emisores (Ne) por línea regante (Lr). Para encontrar este parámetro se procede a realizar aproximaciones sucesivas (tanteos) y se hace uso del CSM del Cuadro 10, y se aplica la expresión 19.

$$Ne = \left[\frac{\Delta HLr}{\left(\frac{10.29 C^2 S_e}{D^{16/3}} + \frac{K_g}{2gA^2} \right)(Qe)^2 CSM} \right]^{1/3}$$

$$Ne = \left[\frac{0.32}{\left(\frac{(10.29)(0.008)^2(12)}{(0.0158)^{16/3}} + \frac{0.5}{(19.62)((0.785)(0.0158)^2)^2} \right) * \left(\frac{52.8}{3.6 * 10^6} \right)^2 * 0.44} \right]^{1/3}$$

$$Ne = 4.88\ H \approx 5$$

Donde HLr es la pérdida de carga permisible en línea regante en (m), C es el coeficiente de rugosidad de la tubería (adimensional), Se es el espaciamiento entre goteros (m), D el diámetro interior del tubo (m), K_g es el coeficiente por conexión del emisor para la perdida localizada (adimensional), g es la aceleración de la gravedad (9.81 m s^{-2}), A es el área de flujo transversal (m^2), Qe es el caudal medio del gotero, que para este caso se determina por el numero de goteros que constituyen al emisor que es (Ng)*(qg) en L h^{-1} y que debe procesarse en metros cúbicos sobre segundo (m^3 s^{-1}); para su conversión se divide entre 3.6 * 10^6 (factor de conversión de L h^{-1} a m^3 s^{-1}) y CSM es el coeficiente de salidas múltiples (adimensional).

Solución de número de salidas del anterior caso, con el método analítico de la polinomial de tercer grado

Cuadro 15. Datos del ejemplo numérico

Parámetro	Valor
H_t: Pérdida permisible en el lateral (m)	0.32
S: Separación entre emisores (m)	12
D: Diámetro del lateral (m)	0.0158
g: Aceleración de la gravedad ($m\ s^{-2}$)	19.62
n: Factor de fricción de manning (adim)	0.008
q: Gasto en cada salida ($m^3\ s^{-1}$)(52.8/3.6*10^6)	$1.4667*10^{-5}$
K: Factor de pérdida localizada por cada salida	0.5
A: Área de la tubería (m^2); 0.785*(0.0158)^2	$1.960*10^{-4}$

$$F(N) = 2*N^3 + 3*N^2 + N - \frac{6*H_T}{\left[\frac{10.29*n^2*q^2*s}{D^{\frac{16}{3}}} + \frac{k*q^2}{2*g*A^2}\right]} = 0.0$$

Si se considera la ecuación polinomial cúbica de la forma:

$$F(N) = N^3 + \frac{3}{2}*N^2 + \frac{1}{2}*N - \frac{3*H_T}{\left[\frac{10.29*n^2*q^2*s}{D^{\frac{16}{3}}} + \frac{k*q^2}{2*g*A^2}\right]} = 0.0$$

Donde: $a1=\frac{3}{2}$; $a2=\frac{1}{2}$;

$$a3=\left\{\frac{-3*0.32}{\left[\frac{10.29*(0.008)^2*(1.4639*10^{-5})^2*12}{(0.0158)^{5.3333}} + \frac{0.5*(1.4639*10^{-5})^2}{2*9.81*(0.785(0.0158)^2)^2}\right]}\right\}$$

A3 = -137.214

$Q = -\frac{1}{4}$; R= 68.607

Z=5.158; T= 0.016;

$D=Q^3 * R^2$

Donde a D, se conoce como discriminante y es mayor de cero:

Finalmente se procede a calcular el número de salidas mediante la ecuación 30.

$$N = Z + T - \frac{1}{3} * a_1 = Z + T - \frac{1}{2} = 5.158 + 0.016 - 0.5 = 4.7$$

La solución es 4.7 salidas y se aproxima a 5 salidas.

Resolución del número de salidas múltiples usando el método de Newton-Ramphson

De la ecuación 24, nombrando una variable de control de varios parámetros e igualando la función matemática a cero, se obtiene:

$F(N) = H_t - C*(2*N^3 + 3*N^2 + N) = 0$

$F'(N) = -C*(6*N^2 + 6*N * 1)$

Donde:

$$C = \left[\frac{10.29 * n^2 * q^2 * s}{D^{\frac{16}{3}}} + \frac{k_G * q^2}{2 * g * A^2} \right] * \frac{1}{6}$$

Para iniciar un método iterativo se asume como un ejemplo un valor inicial de N=10 salidas para una precisión de 0.01.

Cuadro 16. Iteraciones Newton-Ramphson para encontrar la solución

No. De salidas	Función	Derivada
6.92	-2.3736	-0.7707
5.286	-0.6286	-0.3847
4.737	-0.1285	-0.2337
4.675	-0.011846	-0.1913

Número de líneas regantes (NLr) en el distribuidor

Esta ecuación se puede resolver por tanteos, si se conoce Ne sustituyendo el CSM correspondiente, hasta que el resultado sea igual al Ne conocido o utilizar un método numérico más eficiente como el de Newton-Ramphson o analítico de la polinomial de tercer grado presentados anteriormente. Para el caso de distribuidores, es básicamente la misma ecuación 19, haciendo los cambios apropiados para el distribuidor.

$$NLr = \left[\frac{\Delta H_D}{\left(\frac{10.29\, C^2\, S_{Lr}}{D^{16/3}} + \frac{K_g}{2gA^2} \right) * \left(\frac{q\, Lr}{3.6 * 10^6} \right)^2 * CSM} \right]^{1/3}$$

$$NLr = \left[\frac{0.97}{\left(\frac{(10.29)\,(0.008)^2\,(12)}{(0.0525)^{5.333}} + \left(\frac{0.5}{19.62\,(0.785\,(0.0525)^2)^2} \right) \left(\frac{528}{3.6 \times 10^6} \right)^2 \right) * 0.3668} \right]^{1/3}$$

$$NLr = 12.82\ H \approx 13$$

Donde ΔH_D es la pérdida de carga permisible en el distribuidor (m), C es el coeficiente de rugosidad de la tubería (adimensional), S_{Lr} espaciamiento entre líneas de riego (m), D el diámetro interior del tubo en m, K_g es el coeficiente por conexión de la tubería (te o silleta) para la perdida localizada (adimensional), g es la aceleración de la gravedad (9.81 m s^{-2}), A es el área de flujo transversal del distribuidor en m^2, qLr es el gasto por línea regante para la alimentación de los emisores, en cada punto de conexión se alimentan dos líneas por lo que qLr = (Qe)NLr(2) = 528 L h^{-1}, el valor de 3.6 *10^6 es un factor de conversión de L h^{-1} a m^3 s^{-1} y, CSM es el coeficiente de salidas múltiples (adimensional).

Superficie irrigada por unidad de riego (Sur)

Longitud de la tubería regante (Lr)

Lr = (Ne)(Se) = (5) (12 m) = 60 m

Longitud de la tubería de distribución (LD):

LD = (NLr) (S_{Lr}) = (13) (12 m) = 156 m.

Sur = (2 LD) (2 Lr) = (2*156 m) (2*60 m) = 37,440 m^2 = 3 - 74 - 40 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 se tiene,

Gasto por unidad de riego:

$$\text{Número de árboles} = \frac{\text{Superficie de la unidad}}{\text{Área de plantación}} = \frac{37440\,m^2}{144\,m^2} = 260$$

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

$$= \frac{(1267.2L)(260\,\text{árboles})}{24} = 3.81\,L\,s^{-1}$$

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.

$$\text{Número de unidades} = \frac{Q\ \text{fuente}}{Q\ \text{unidad}} = \frac{12\,L\,s^{-1}}{3.81\,L\,s^{-1}} = 3.15 \cong 3\ \text{unidades}$$

Cálculo de la tubería de conducción

Para el cálculo de las pérdidas por fricción en cada tramo de conducción se utiliza la Ecuación 5 de Manning. Los tramos se muestran en el croquis del ejemplo (Figura 40)

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

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

Los resultados de los cálculos de Hf para cada uno de los tramos se muestran en el Cuadro 17, así como las variables involucradas en el procedimiento.

Cuadro 17. Pérdidas de carga hidráulica en tuberías de conducción del ejemplo de diseño en nogal

Tramo	L (m)	D (m)	Q L s^{-1}	Q $m^3 s^{-1}$	Hf (m)
0-1	80	0.1023	11.43	0.01143	1.31
1-2	125	0.1023	7.62	0.00762	0.91
2-3	125	0.0779	3.81	0.00381	0.98

-Pérdida de carga total en conducción (Htc):

$Htc = Hf_{0-1} + Hf_{1-2} + Hf_{2-3,}$ $Htc = 3.20$ m

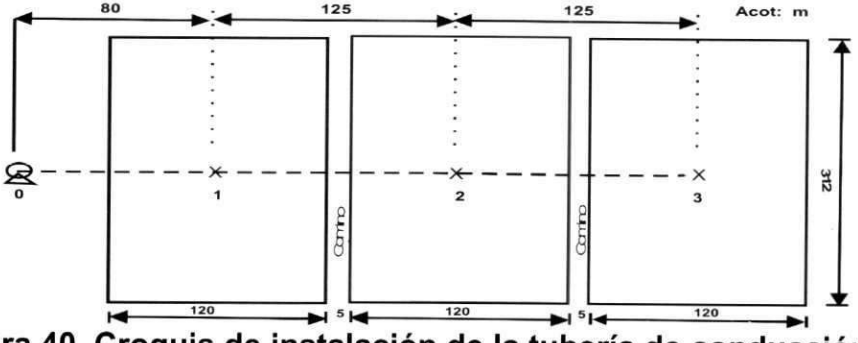


Figura 40. Croquis de instalación de la tubería de conducción de la superficie de riego proyectada

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 se obtiene al consultar el catalogo correspondiente en lo que respecta a la marca y el modelo (http://www.netafim.com.ar/1354/)

Capacidad = 35 - 52 ($m^3 h^{-1}$); Conexión = 0.1016 m (4") x 0.0762 m (3");Con operación manual.

Filtro de malla

Este se selecciona de acuerdo al gasto del sistema; para este caso es de 11.43 L s^{-1} (41.15 $m^3 h^{-1}$) y el más adecuado es también conforme a folleto del fabricante (http://www.netafim.com.ar/1355/).

Capacidad = 50 $m^3 h^{-1}$; Conexión = 0.0762 m (3"); de entrada y salida, con operación manual y con un grado de filtración disponible de 40 – 140 Mallas.

Con respecto al número de malla, se recomienda aquel 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 referente a la eficiencia de bombeo, potencia requerida, tamaño, velocidad de giro, marca y modelo, así como el gasto y carga de bombeo óptimos.

Otro criterio de selección de la bomba es el utilizar las fórmulas correspondientes (Ecuaciones 7, 8 y 9) donde sólo se calcula la potencia que se requiere en la flecha de la bomba, así como la potencia del motor.

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

$$POT_B = \frac{Q_B * HT_B}{\eta_b * 76} = \frac{11.43 * 16.2}{0.5974 * 76} = 4.08 \text{ HP}$$

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 = Ho + Htc + HCC + T en (m), de la que Ho es la Carga de operación (7 m), HTC son las pérdidas de carga total de conducción (3.20 m), HCC las Pérdidas de carga del cabezal de control (6.0 m), T es el desnivel topográfico (0.0 m), h_b es la eficiencia de la bomba (adimensional) y 76 es el factor de conversión a HP.

El valor de la eficiencia de bombeo (h_b) que se obtiene por medio de la ecuación 8, con Q = 11.43 L s^{-1} se obtiene un eficiencia mecánica de 59.74 % considerándose esta como la eficiencia de bombeo:

$$\eta_m = \frac{1}{0.013274667 + \frac{0.039597151}{Q}} \qquad 31a$$

Cálculo de la potencia del motor.

$$Pot_m = \frac{POT_B}{\eta_{mot}} = \frac{4.08}{0.81} = 5.03 \text{ HP}$$

Donde n_{mot} es la eficiencia del motor (adimensional), se reporta en porcentaje, se procesa en decimal y se obtiene del Cuadro 7. El motor próximo a 4.08 HP son 5 HP, y funcionará a 3450 rpm con una eficiencia de 81 por ciento, el calculo de la potencia de motor indica que se requieren 5.03 hp optando por el de 5 HP.

Nota: Para motores de combustión interna nuevos generalmente los fabricantes recomiendan considerar un 85 por ciento de eficiencia del motor.

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 de N, por cm 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 64 g ($N\ cm^{-1}$) * 30 cm = 1920 g (N).

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

$$\frac{1920\,g\,(N)*1000\,g\ urea}{460\,g\,(N)} = 4174\ g\ urea$$

Se recomienda que por cada 130 g de agua se agreguen 100 g de urea, para obtener una solución homogénea; por lo tanto, el volumen (L) de agua por árbol es de:

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

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

Por cuestiones de diseño, el lote de terreno se divide en tres unidades de riego y se recomienda fertilizar una por una. En este caso, cada unidad de riego consta de 260 árboles; por lo tanto, la cantidad de agua con fertilizante que debe aplicarse en el ciclo vegetativo del nogal se calcula de la siguiente manera:

(5426 L agua / árbol) * (260 árboles) = 1410.76 L de solución.

Para la inyección de fertilizantes a través del sistema de riego se optó por la selección de un venturi, se seleccionó de acuerdo al gasto operativo del sistema y con catálogos existentes de los diversos fabricantes. En este caso se usó el catálogo de Mazzei (http:// www.mazzei.net/) y se eligió el modelo 3090 de tres pulgadas de diámetro que trabaja con un gasto de 9.65 L s^{-1}, una carga hidráulica de entrada 14.0 m, y en la salida de 10.5 m de presión y deja de succionar a una carga de 12.0 m. Con tales condiciones hidráulicas el dispositivo succiona un gasto de 1,638 L h^{-1}. Para su instalación se sugiere el Boletín Técnico N° 5 (http://www.mazzei.net/Espanol/Tech_Bulletins/ES-TB-05.PDF) en el que se indica que se instale en la línea de conducción con desviación a "by-pass".

Para la Región Lagunera, el INIFAP recomienda fertilizar el nogal en dos etapas: marzo y junio, por lo cual la cantidad total por ciclo se fracciona en varias aplicaciones repartidas en dicho rango de meses. Un programa tentativo de fertilización sería el siguiente:

Tres unidades requieren 4,232 litros de solución por ciclo, si se fracciona en seis aplicaciones se necesita un volumen de 705 litros en las tres unidades, con un tinaco de 1,000 litros de donde el vérnturi succione la solución nutritiva en cada aplicación para distribuirla en las unidades a un gasto de 2,178 L h^{-1}.

La aplicación de fertilizantes por medio de los sistemas de riego presurizados ha cobrado tal importancia que los equipos y dispositivos en la actualidad son muy variados, requiriendo especificaciones de diseño adicionales.

OPERACION DE SISTEMAS DE RIEGO POR GOTEO

Programación y requerimiento del riego

Una característica fundamental de cualquier método de riego es proporcionar el agua en la cantidad requerida y distribuida uniformemente en el suelo cultivado. En el caso particular del sistema de riego por goteo, su funcionamiento eficiente requiere que se distribuyan uniformemente tanto el agua como los nutrimentos, ya que la fertilización se aplica a través del sistema de riego. Para lograr esto no basta con diseñar adecuadamente el sistema de riego sino que se requiere también operarlo de manera correcta a través del ciclo del cultivo. De poco serviría la instalación de un sistema de riego por goteo bien diseñado si no se tiene cuidado en su operación.

Programación del riego

La programación del riego involucra la determinación de la cantidad y oportunidad del riego, es decir, cuánto y cuándo regar los cultivos con el propósito de prevenir los efectos adversos del estrés hídrico y el sobre riego. Aun cuando se han propuesto varios métodos para realizar esta tarea, el del balance de agua en el suelo es el método más comprensible y utilizado:

$$\Delta\theta = R + P - ET - D \qquad 32$$

Donde $\Delta\theta$ es el cambio del contenido de agua del suelo en un período determinado (cm), R la cantidad de agua aplicada con el riego (cm), P la lluvia (cm), ET la cantidad de agua consumida o evapotranspiración del cultivo (cm) y D el agua drenada por debajo de las raíces de las plantas (cm). El término evapotranspiración (ET) se utiliza para referirse al proceso combinado de la evaporación del suelo, de las superficies de las plantas y de la transpiración del agua a través de sus tejidos (FAO, 1996; FAO, 1989).

El método anterior supone la determinación de cada uno de los componentes del balance de agua en el suelo para poder estimar su abatimien-

to de humedad y con ello la cantidad de agua por aplicar al cultivo. Supone también la determinación de la capacidad del suelo para retener el agua y con ello, el momento de aplicación de los riegos con base en un abatimiento máximo de la humedad en el suelo. Sin embargo, no siempre se dispone de información o instrumentación necesaria para estimar tales componentes, especialmente ET y D.

Debido a lo anterior, la oportunidad del riego regularmente se define con base en indicadores del estrés hídrico del cultivo, los cuales señalan la necesidad del riego. Estos pueden ser simples observaciones para detectar cambios morfológicos de las plantas, así como índices edáficos como el contenido de agua y la tensión de humedad del suelo, ambos relacionados a través de la curva de retención de humedad que indica la fuerza con que el agua es retenida por el suelo, la cual se relaciona con el estado hídrico del cultivo.

Requerimiento de riego

El conocer los requerimientos de agua de los cultivos resulta fundamental para el diseño y operación de cualquier sistema de riego. Existen diversas formas o métodos para determinar de manera directa o indirecta la cantidad de agua consumida por el cultivo (ET). Se han utilizado lisímetros de pesada para determinar directamente todos los componentes del balance de agua en el suelo con gran precisión y resolución, sin embargo, es un equipo costoso y poco disponible que normalmente se utiliza con fines de investigación para validar otros métodos.

Otras formas para estimar el requerimiento de riego se basan en el uso de instrumentos para medir directa o indirectamente el contenido de agua o la tensión de humedad del suelo. Con el monitoreo de estas variables en el tiempo se estiman las pérdidas de agua que deben recuperarse con el riego. Por lo general, esta cantidad representa la diferencia entre las entradas y salidas de agua en el suelo (riego+precipitación-ET), ya que se considera, no siempre de manera atinada, que las pérdidas de agua por percolación o drenaje son despreciables.

El método gravimétrico para medir el contenido de agua en el suelo es un método directo para estimar el requerimiento de riego, el cual se basa en la colección de muestras y su secado para determinar, por diferencias de peso, la variación del contenido de agua del suelo a través del tiempo. Se utiliza poco por ser un método laborioso, destructivo y lento, ya que se necesitan 24 horas para secar completamente las muestras del suelo.

Otro método directo es el uso de tensiómetros para detectar la tensión de humedad del suelo. Es el método más utilizado en el riego por goteo por ser práctico y mide en forma precisa la tensión de humedad en el rango que es común en los sistemas de riego localizado (10-50 centibars). Los cambios en la tensión de humedad se traducen en cambios del contenido de agua del suelo con la curva de retención de humedad.

En lo que respecta a los métodos indirectos se tiene al aspersor de neutrones, que mide indirectamente el contenido de agua en el suelo y cuyo uso es limitado por el riesgo de contaminación y el exceso de regulaciones que implica el empleo de materiales radiactivos. Se tiene también el uso de sensores eléctricos como los basados en el principio de reflectrometría en el dominio del tiempo (Time Domain Reflectometry, TDR), los cuales se utilizan mucho especialmente en investigación y poco a nivel comercial por su alto costo.

Uso de modelos

En la mayoría de los casos el equipo requerido para medir directamente el consumo de agua o evapotranspiración (ET) de los cultivos no se encuentra disponible, por lo que se recurre al uso de modelos físicos y empíricos para estimar indirectamente la ET a partir de datos climáticos y del cultivo. Además, la variabilidad espacial del contenido de agua del suelo dificulta la determinación de ET debido al gran número de muestras, tensiómetros u otros sensores que se requieren para obtener valores confiables y representativos del contenido de agua o la tensión de humedad del suelo. Entre mayor sea la superficie de riego, mayor será el costo y

la incertidumbre en la medición de dichas variables. Sin embargo, es posible aminorar el impacto de esto si se combina la medición directa con el uso de modelos para estimar el consumo de agua y programar los riegos de los cultivos.

Ante la dificultad que implica la caracterización aerodinámica de la cubierta vegetal de cada cultivo, un procedimiento común para estimar ET consiste en estimar primero la evapotranspiración de referencia (ETr) y luego aplicar coeficientes adimensionales de cultivo y de suelo para estimar ET (Doorennbos y Pruit, 1977; Allen *et al.*, 1989). La ETr es la ET de un cultivo de referencia como el pasto o la alfalfa bien irrigado, sin restricción de humedad en el suelo:

$$ET = Kc * Ks * ETr \qquad 33$$

$$KC = \frac{ET}{ETr} \qquad 34$$

Donde KC es un coeficiente adimensional específico de cada cultivo que depende de su estado de desarrollo, por lo cual varía en el tiempo y expresa el grado de similitud entre la superficie vegetal del cultivo y la del cultivo de referencia. Sus valores se obtienen empíricamente a partir de datos experimentales (Doorenbos y Pruit, 1977; Inzunza y Mojarro, 1994 Annandale y Stockle, 1994). El coeficiente Ks indica el efecto restrictivo que ejerce la disminución del contenido de agua del suelo sobre ET entre un riego y otro.

En los inicios del riego por goteo fue común utilizar el método del tanque evaporímetro para determinar cuánta agua y con que frecuencia regar. El método se basa en la medición de la evaporación directa del agua y el uso de un coeficiente adimensional conocido como "coeficiente del tanque" para estimar ETr. Aun cuando la evaporación integra de alguna manera los efectos de la radiación, viento y temperatura, las diferencias entre la superficie libre del agua y la del cultivo de referencia ponen en duda la relación lineal asumida entre la evaporación y ETr. Existen algunos

modelos para estimar ETr a partir de datos del cultivo como el índice de área foliar y de datos climatológicos como la temperatura y humedad del aire, radiación solar y velocidad del viento. Todos tratan de representar, con diferente grado de complejidad, los principios físicos que gobiernan el flujo evapotranspirativo (Jensen *et al.*, 1990). Uno de los más completos y precisos es la ecuación de Penman-Monteith (Monteith, 1981), la cual resuelve el balance de energía y utiliza todas las variables del clima antes mencionadas. Las estaciones meteorológicas automáticas regularmente incluyen el cálculo de ETr con esta ecuación. Otros modelos para estimar ETr utilizan algunas de las variables del clima, como el de Hargreaves y Samani (1982) que utiliza las temperaturas del aire máxima y mínima diarias:

$$ETr = 0.0023\ Ra\ TD^{1/2}(T + 17.8) \qquad 35$$

Donde Ra es la radiación solar extraterrestre estimada al tope de la atmósfera para cualquier sitio y expresada en unidades equivalentes de evaporación de agua (mm), TD la diferencia entre las temperaturas del aire máxima y mínima (°C) y T el promedio de dichas temperaturas (°C).

Selección del método

Al seleccionar un método para determinar las necesidades de agua y la programación del riego debe tomarse en cuenta su precisión, facilidad de uso, costo y disponibilidad de equipo e información. Cuando es posible, la medición directa del contenido de agua o la tensión de humedad del suelo provee la mayor precisión, especialmente cuando se utilizan tensiómetros. La mayor limitante a este método es el costo del equipo, ya que cada tensiómetro cuesta alrededor de 150 dólares y se requieren tres, instalados a diferentes profundidades en el suelo en cada sitio de medición. Además se requieren varios sitios de medición, dependiendo del tamaño de la superficie irrigada y la variabilidad de las características físicas del suelo que impactan su contenido de agua y tensión de humedad. El uso de modelos es una opción viable para estimar indirectamente el consumo de agua y programar los riegos de los cultivos cuando los recursos son insuficientes.

Para esto se requiere acceso a datos climáticos históricos o en tiempo real. Existen algunos programas de cómputo que realizan dicha tarea como el de Ojeda *et al.* (1999) quienes desarrollaron un sistema de pronóstico del riego de los cultivos en tiempo real a nivel de unidad o módulo de riego y lo aplicaron en el Distrito de Riego 076, Valle del Carrizo, Sinaloa. También Catalán *et al.* (2005 y 2007) desarrollaron una aplicación computacional en línea para realizar, a través de la red de Internet, el cálculo de las demandas de agua y la programación de los riegos de los cultivos en los distritos de riego del país con base en la información climática histórica. Como ya se indicó antes, este tipo de herramientas pueden utilizarse, de manera complementaria, con el monitoreo o medición directa del contenido de agua o la tensión de humedad en el suelo con el propósito de disminuir la incertidumbre inducida por la variabilidad espacial de dichas variables.

Operación del cabezal de control

El método de riego por goteo es uno de los sistemas avanzados que se tiene en la actualidad para suministrar el agua de riego a los cultivos, siendo el cabezal de control una de las partes esenciales del sistema, y consta de los siguientes dispositivos:

Fuente de abastecimiento de agua

La fuente de abastecimiento puede ser cualquiera de los siguientes: río, acequia, canal, estanque, noria y pozo profundo; pero el agua más recomendable para el riego por goteo es la de pozo profundo por su baja concentración de bacterias y sólidos en suspensión.

Sin embargo, esto no impide que no se puedan usar con este fin las aguas superficiales (ríos, acequia, canal), su utilización implica un perfecto filtrado en varias etapas antes de poder utilizar el agua.
Bomba.

proporcionar el gasto de los goteros, que es de 2 y 4 L h^{-1}, de ahí tomando en cuenta las pérdidas por fricción en las tuberías y por piezas especiales como son los filtros, tanque fertilizador e hidrociclón; es necesario una carga hidráulica no menor de 25 m al principio de la red de tubería, la cual debe proporcionarse por medio de una bomba. La opción de utilizar tanques elevados no es una solución adecuada por su alto costo y son convenientes únicamente en lugares donde la topografía del terreno permite aprovechar los fuertes desniveles del terreno.

Tanque Fertilizador

Este dispositivo es fundamental en un sistema de riego por goteo, ya que es esencial la aplicación del fertilizante a través del agua de riego en forma dosificada, facilitando la operación. Con este tanque se evita mano de obra para la fertilización y pérdidas de material fertilizante, además se asegura una fertilización uniforme y dosificada durante el ciclo vegetativo del cultivo.

Para la aplicación de fertilizantes a través del sistema, el funcionamiento se basa en la diferencia de presión en la entrada de agua a dicho tanque e impulsa los fertilizantes a desplazarse hacia la red de riego; la presión requerida se obtiene cerrando la válvula intermedia hasta que se produzca la diferencia de presión que se busca.

El tiempo de vaciado del tanque depende tanto de la caída de presión como del diámetro de los tubos conductores del tanque. El tiempo puede calcularse en forma aproximada, de acuerdo al Cuadro 18.

Cuadro 18. Flujo de la solución a través del tanque (L h^{-1}) en función de las diferentes pérdidas de presión

Tubos del tanque (pulg)	Pérdidas de presión (m)			
	1	2	3	4
3/8	240	340	430	500
1/2	300	420	520	600

Manómetro

La principal función del manómetro es de indicar la presión con la que el agua se conduce a través en el sistema (Figura 20). Este dispositivo puede ser un auxiliar para detectar las anomalías en el funcionamiento del equipo, ya que a presiones más bajas o más altas que las del proyecto presentarían obstrucciones, taponamientos o fugas en el equipo, por lo que será necesario corregir para proporcionar el agua adecuada a los cultivos.

Filtros

El filtrado es una de las partes más importantes de cualquier sistema de riego por goteo, y el no respetar este principio acarreará serios problemas debido a taponamientos en los goteros, generalmente por incrustación de materiales sólidos de naturaleza orgánica e inorgánica (arena, restos de vegetales e insectos) que disminuyen la capacidad de goteo o llegan a obstruir totalmente a los emisores.

Para evitar estos problemas se deben instalar después del tanque fertilizador ciertos dispositivos de filtración que impiden el paso de materiales perjudiciales a los goteros o emisores.

Para obtener un buen filtrado es recomendable utilizar el filtro de arena, filtro de malla de acero e hidrociclón o de fuerza centrífuga. En ocasiones es aconsejable la instalación combinada de los tres tipos de filtros, lo cual encarece un poco el sistema, pero garantiza su funcionamiento eficiente, excepto el originado por la incrustación de sales.

Filtro de arena

Es un cilindro metálico grande instalado en posición vertical, el cual contiene una capa de arena y grava de diferentes diámetros; el agua entra al filtro por su parte superior y mediante el uso de presión sale por la parte

inferior del mismo. Este filtro se recomienda cuando el agua contenga cantidades considerables de algas y el tratamiento químico no sea adecuado; cuando esto sucede por ningún motivo deberán usarse filtros de mallas, pues éstas se taparían rápidamente haciendo necesario lavados frecuentes. Los filtros de arena deberán tener retrolavado para hacer sencillo el proceso de limpieza.

Para obtener una mayor eficiencia en el filtrado, la selección se hará de acuerdo con la clase de sólidos en suspensión. En la mayoría de los casos será necesario utilizar cuando menos un tipo de filtro, en otros casos una combinación de dos o tres de los mencionados y ocasionalmente se deberá recurrir a tratamientos químicos.

Filtro de malla

Es un cilindro de metal que contiene dos piezas de filtrado de material plástico, recubierto con una malla de acero inoxidable; es el más sencillo y más comúnmente usado en los sistemas de riego por goteo.

Existen además filtros de malla con y sin retrolavado; sin embargo, deberán preferirse los primeros ya que los elementos filtrantes se pueden limpiar fácil y rápidamente sin sacar las mallas de los tanques y sin interrumpir la operación del riego.

Hidrociclón

Es un dispositivo centrifugador destinado a separar la arena de las aguas de riego. Este dispositivo viene instalado en el cabezal del sistema y funciona con la máxima eficiencia. Este centrifugador puede adecuadarse a cualquier volumen de suministro de agua, y es uno de los accesorios más importantes del sistema de filtros, ya que no existe riesgo de que se produzca obstrucción alguna.

La arena que se acumula separada del agua se concentra en un

recipiente y puede eliminarse de la siguiente manera:

- Abriendo la tapa del recipiente cuando el sistema está apagado y eliminar la arena en forma manual.

Limpieza de Filtros

Para obtener una mayor eficiencia de distribución del agua hay que limpiar los filtros antes de cada operación de riego; si las aguas están muy sucias los filtros se obstruyen con facilidad y hay que hacer la limpieza con mayor frecuencia.

Después de la limpieza de los cilindros se tiene que revisar minuciosamente el estado de las redes; si se observa agujero o rajadura alguna, hay que cambiar de inmediato el cilindro de la malla.

Para obtener un buen funcionamiento del equipo se debe controlar la presión durante toda la operación; si la presión baja por obturación, hay que limpiar los filtros, y si la presión baja por una falla general, hay que suspender por completo la operación del riego.

Válvulas de Alivio

Son necesarias estas válvulas en un sistema de riego por goteo para contrarrestar las elevaciones bruscas de presión (Figura 41).

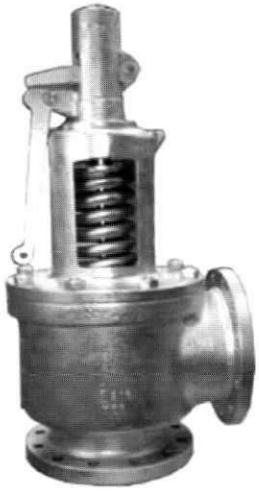


Figura 41.- Válvula de alivio de presión

Aplicación de fertilizantes en los sistemas de riego por goteo

Con el fin de programar la periodicidad de las aplicaciones de fertilizantes en los cultivos a través de estos sistemas de riego es necesario considerar las etapas fenológicas que son críticas en el requerimiento de nutrimentos y el programa de riego de los mismos. Así por ejemplo, para el maíz bajo las condiciones de la Región Lagunera, la dosis recomendada es de 120- 40- 00 y sus etapas fonológicas críticas para N son la siembra y el inicio de floración (60-65 días). Para fósforo, la etapa crítica es de siembra a la cuarta hoja extendida (30 días), por lo que se dispone de estos intervalos para fraccionar la dosis en un número de aplicaciones convenientes. Para la determinación de la cantidad del producto químico (C_{pq}) por aplicar, se utiliza la Ecuación 36.

$$C_{pq} = \frac{S_e S_{LR} N_e DP_{CH}}{10000} \qquad 36$$

Donde C_{pq} representa la cantidad del producto químico (kg), S_e es la separación de los emisores (m), S_{LR} es la separación de líneas regantes (m), Ne es el número de emisores y el DPch es la dosis del producto comercial por hectárea (kg ha^{-1}) El volumen a inyectar de la solución al sistema de riego se puede calcular con la Ecuación 37.

$$V_{tsq} = \frac{C_{pq}}{S_{pq}} \qquad 37$$

Donde V_{tsq} representa al volumen total de solución química a inyectar (L), Spq es la solubilidad del producto químico (kg L^{-1}) y Cpq es igual al valor obtenido con la Ecuación 36. Otra de las parámetros importantes a considerar en la operación del fertirriego es la solubilidad y la composición de los principales productos comerciales a utilizar; en el Cuadro 19 se muestran los principales materiales comerciales con su composición y solubilidad.

Cuadro 19. Solubilidad y composición de los fertilizantes más utilizados (Vermerein y Jobling, 1986)

Abono principal	*g L^{-1}	N	(%) P_2O_5	K_2O	Abono secundario	*g L^{-1}
Nitrato de amonio (N)	1180	33-34			Boro (B)	5
Sulfato de amonio (N)	700	21			Cloruro de calcio (ca)	60
Nitrato de calcio (N)	1350	15-15			Óxido de cobre (Cu)	Insoluble
Fosfato diamónico (NP)	420	21	54		sulfato de cobre (Cu)	22
Fosfato Monoamónico (PN)	230	11	48		Sulfato de hierro (Fe)	29
Nitrato de sodio (N)	730	16			Sulfato de magnesio (Mg)	71
Nitrato de potasio (NK)	140	12-14		44-46	Sulfato de manganeso (Mn)	105
Superfosfato simple (P)	20		16-20		Sulfato de zinc (Zn)	75
Superfosfato triple (P)	40		46		Molibdato de sodio (Mo)	56
Urea (N)	800	45-46				

* Solubilidad en agua fría

Gasto de Inyección

Se utiliza la ecuación 38 para el cálculo del gasto de inyección al sistema del riego por goteo y el cual esta en función del total del volumen de la solución química a inyectar y del tiempo de operación disponible del sistema de riego.

$$Q_i = \frac{V_{tsq}}{t} \qquad 38$$

Donde Qi representa al gasto de inyección (L min^{-1}), t es el tiempo de operación del sistema de riego por goteo (min) y V_{tsq} representa al volumen total de solución química a inyectar (L).

Métodos de inyección de productos químicos en sistemas de riego por goteo

1. Dispositivos que trabajan por diferencia de presión (carga) mediante válvulas

a) Vénturi inyector de fertilizante

b) Dosificador de tanque con tapa hermética

2. Bombas independientes

Generalmente se trata de pequeñas bombas de pistones o diafragma que trabajan con gastos de 20 a 75 L h^{-1} y altas cargas de operación e impulsadas con motores de poco caballaje.

En relación al funcionamiento la diferencia principal entre la aplicación de fertilizantes por dispositivos que funcionan por diferencia de presión y por medio de bombas de inyección es que en el primer caso la concentración varia con el tiempo y en el segundo la concentración es constante. Sin embargo en el primer caso la cantidad que se aplica puede variar si se aplica una misma preparación de solución fertilizadora para ser depositada en diversos sitios, pero si la totalidad del fertilizante se aplica a un

solo sitio y se le da un tiempo de aplicación suficiente se garantiza que la aplicación sea la deseada y el cálculo del tiempo de inyección del fertilizante se hace de la misma forma que cuando se usa una bomba independiente

Para aplicar fertilizantes en los sistemas de riego por goteo mediante dispositivos que funcionan con diferencia de presión, Vermerein y Jobling (1986) proponen el uso de la ecuación 39 para calcular el tiempo de inyección para cada uno de los sitios.

$$t = \frac{2.3 \log \frac{C_t}{C_o}}{k} \qquad 39$$

Donde t representa al tiempo de aplicación o inyección, k es la relación del gasto (q) que entra al tanque fertilizador y el volumen (v) de este (L h^{-1} L^{-1}), C_t es la concentración del nutriente en el tanque a un tiempo (t), C_o es la concertación inicial (%) y se obtiene con la ecuación 40.

$$C_o = \frac{C_{pq}}{q} * 100 \qquad 40$$

La superficie total representa el 100 %, por lo que el número de sitios en los que se aplicará el fertilizante representa una fracción de este y por analogía se relaciona con el término C_t/C_o expresado en % y le corresponde el mismo valor. El tiempo por sitio se obtiene por diferencia entre el tiempo a un valor N de C_t/C_o y n-1 de C_t/C_o.

Con el fin de dar mas claridad a lo anterior, suponga que k=q/v=0.05 y que se tiene una concentración conocida de fertilizante en la solución fertilizadora que constituye el 100 % y que se aplicara en 4 sitios, por lo que el área por sitio es un 25 % del total; manejando los términos C_t/C_o y t mediante la Ecuación 39 se obtienen los datos mostrados en el Cuadro 20.

Cuadro 20. Tiempo por sitio de aplicación del fertilizante

$\frac{C_t}{C_o}(\%)$	t (h)
100	0
75	5.5
50	13.0
25	28.0
1	90.0

Por lo tanto, el tiempo (h) para los sitios del 1 al 4 sería el siguiente:

t_1 (100-75)=5.5-0=5.5
t_2 (75-50)=13-5.5=7.5
t_3 (50-25)=28-13=15
t_4 (25-1)=90-28=62

También se puede usar la Figura 42 para determinar el tiempo de aplicación (inyección) de fertilizante con sistemas de riego por goteo y mediante dispositivos que funcionan con diferencia de presión y para diversos sitios a partir de una misma solución fertilizadora.

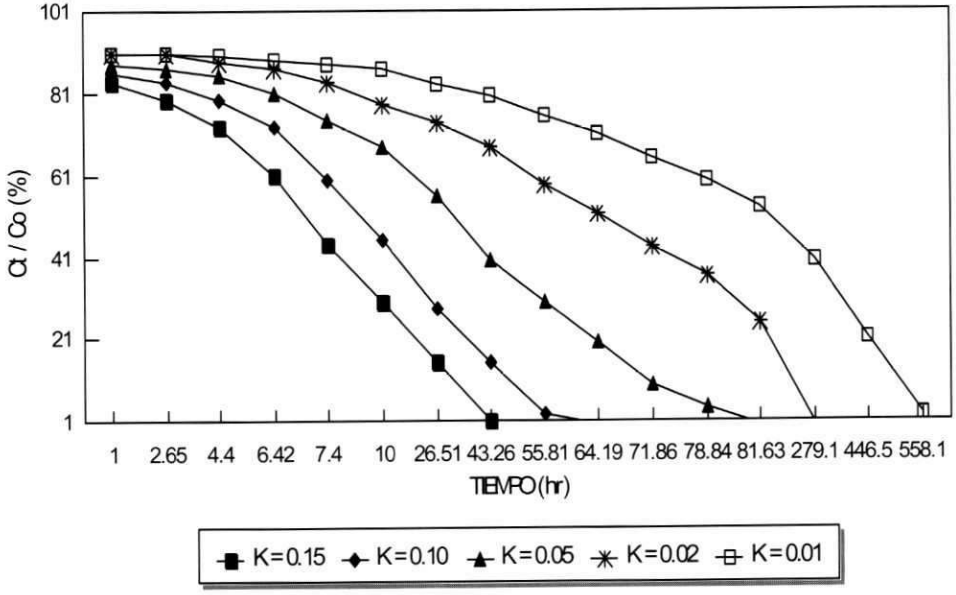


Figura 42. Curvas entre la relación de la concentración en el tanque y la concentración inicial ($C_t\ C_o^{-1}$) y el tiempo (t) para distintos valores de k ($g\ v^{-1}$)

No se reportan problemas de daños al cultivo con la concentración de nutrientes en el agua del sistema de riego por goteo, ya que la dosis total de fertilización se fracciona en forma práctica en un número adecuado de aplicaciones a través del ciclo. Al respecto, Vermerein y Jobling (1986), reportan la ecuación 41 para determinar la cantidad de fertilizante que se necesita inyectar para mantener una concentración adecuada de nutrientes y que no ocasione daños al cultivo al aplicarlo mediante el sistema de riego.

$$CF = \frac{Q * V * CN_{ASR} * 100}{q * CN_F} \qquad 41$$

Programa de Fertigación

En este apartado se propone un método práctico para obtener el programa o calendario de aplicación de fertilizantes a los cultivos, principalmente a cultivos irrigados con sistemas de riego presurizado, es decir en la modalidad conocida como fertirrigación o simplemente fertigación.

Al analizar lo propuesto por Bargueño *et al.* (1994,1995), se puede observar en la información reportada para diferentes cultivos y nutrimentos, que la extracción en todos los casos presenta la tendencia de crecimientos decrecientes. Esta situación al manejarla con datos acumulados, se pueden representar de manera satisfactoria como una curva logística de la forma mostrada por la ecuación 42.

$$F = \frac{b_1}{\left(1 + b_2 * e^{-b_3 \cdot T}\right)} \qquad 42$$

En dicha ecuación, b_1, b_2 y b_3 representan parámetros de ajuste del modelo, la F representa la cantidad a fertirrigar; la variable T es el tiempo de operación para proporcionar la fertirrigación. Debido a que es necesario trabajar con diferentes cultivos cuyas necesidades y ciclos de cultivo son diferentes, se sugiere manejar datos adimensionales, es decir el tiempo en lugar de manejar días manejar porcentajes o tanto a uno, valor que será obtenido dividiendo los días de calendario entre el ciclo de fertirriego; así mismo la fertilización por aplicar también manejarlo en forma porcentual.

Analizando los datos de Burgueño *et al.* (1994), citados en la página 32 y correspondiente al calendario de fertigación de tomate en el Valle de Culiacán, es posible obtener datos acumulados promediados para N, P_2O_5, y K_2O, con los que se obtienen los valores adimensionales. Al utilizar esta información para obtener el valor de los parámetros del modelo logístico, mediante el procedimiento no lineal de mínimos cuadrados proporcionado por el paquete estadístico SAS (1999), se obtiene el modelo propuesto para estimar calendarios de aplicación de los fertilizantes (Cuadro 21, 22, 23 y 24).

Cuadro 21. Datos obtenidos de Burgueño *et al.*(1994), para el cultivo de tomate

Días	Días acumulados	N	P_2O_5	K_2O	N por período	P_2O_5 por período	K_2O por período
5	5	1.04	2.6	0	5.2	13	0
14	19	1.65	2.97	0.17	23.1	41.58	2.38
8	27	2.2	2.86	0.88	17.6	22.88	7.04
20	47	2.43	2.67	1.46	48.6	53.4	29.2
9	56	3.46	2.77	2.77	31.14	24.93	24.93
11	67	2.85	2.28	4.27	31.35	25.08	46.97
7	74	2.9	2.03	5.22	20.3	14.21	36.54
22	96	2.61	1.83	6.54	57.42	40.26	143.88
13	109	2.02	1.21	5.65	26.26	15.73	73.45
18	127	2.09	1.04	4.18	37.62	18.72	75.24

Cuadro 22. Acumulación de datos anteriores y su promedio

N Acumulado	P_2O_5 Acumulado	K_2O Acumulado	Promedio
5.2	13	0	6.07
28.3	54.58	2.38	28.42
45.9	77.46	9.42	44.26
94.5	130.86	38.62	87.99
125.64	155.79	63.55	114.99
156.99	180.87	110.52	149.46
177.29	195.08	147.06	173.14
234.71	235.34	290.94	253.66
260.97	251.07	364.39	292.14
298.59	269.79	439.63	336.00

Cuadro 23. Datos promedio expresados (adimensional)

T unitario	F unitario
0.0394	0.0180
0.1496	0.0846
0.2126	0.1317
0.3701	0.2619
0.4409	0.3422
0.5276	0.4448
0.5827	0.5153
0.7559	0.7549
0.8583	0.8695
1.0000	1.0000

Cuadro 24. Parámetros del modelo logístico

Coeficiente de regresión	Valor (5 % significancia)
b1	1.121605
b_2	23.62681
b_3	5.17909

$$F = \frac{1.121605}{\left(1 + 23.62681 * e^{-5.17909 * T}\right)} \qquad 43$$

Donde F es la cantidad adimensional a fertirrigar y T el tiempo adimensional en que se fertirrigará.

Despejando el tiempo (T) de la ecuación anterior quedaría:

$$T = \frac{LN\left[\left(\frac{1.121605}{F} - 1\right) * \frac{1}{23.62681}\right]}{-5.17909} \qquad 44$$

La sugerencia consiste en proporcionar a los cultivos el fertilizante de acuerdo a la forma logística. Se intuye que estaría mejor proporcionado en cuánto a oportunidad de cómo la planta iría tomando el fertilizante y darle menor oportunidad a que dicho fertilizante se pierda por percolación o volatilización.

Para lo anterior se puede usar la curva logística mostrada en la Figura 43, con la aclaración que puede ser mejorada con más información. Aquí el eje de las ordenadas representa la cantidad de fertilizante acumulada a aplicar, en forma adimensional es decir que varía de 0-1.0.

Ejemplo de cálculo

Para un caso hipotético, donde la cantidad total a fertilizar sea de 200 kg, con un tiempo para realizar la fertilización de 100 días y si se aplica al cultivo dividido en cinco dosis iguales, es decir 40.0 kg por aplicación, la pregunta sería: ¿cada cuándo lo aplico? La respuesta la tiene la curva logística.

Las cantidades se muestran en el Cuadro 25. Donde Y representa la cantidad de fertilizante en forma relativa o adimensional en forma acumulada y la F representa el fertilizante en forma acumulada.

Cuadro 25. Cantidades de fertilizante en forma relativa y acumulado a aplicar

Y	0.20	0.40	0.60	0.80	1.0
F	40	80	120	160	200

El calendario de aplicación resultante de utilizar la curva logística, y considerando la ecuación 44 en términos del tiempo en forma adimensional (X) y la D en días acumulados, sustituyendo los valores previos de (Y) del cuadro 25, quedaría como se muestra en el Cuadro 26.

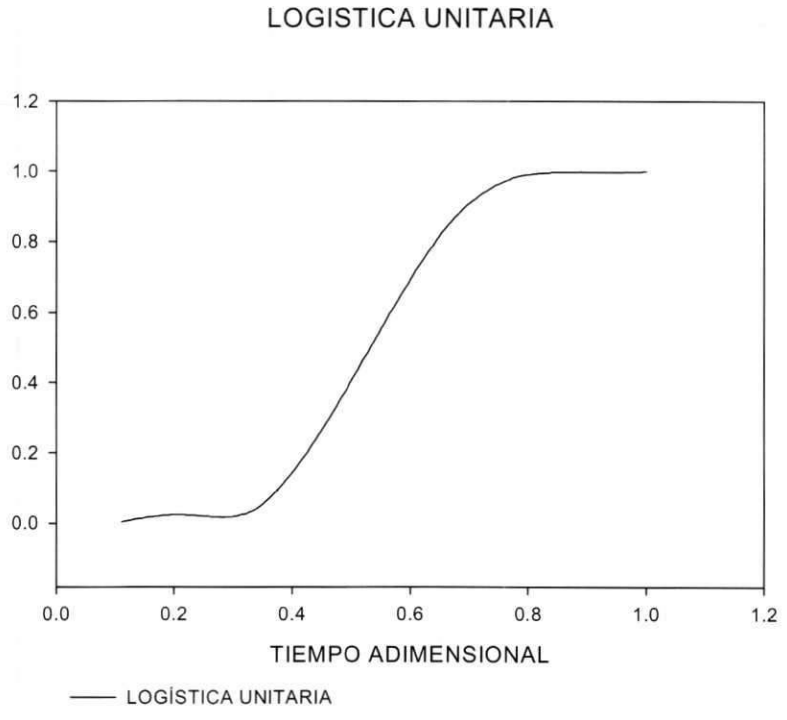


Figura 43. Aplicación de fertirrigación de acuerdo a la forma de la curva logística obtenida

Cuadro 26. Programación de las dosis de fertilizante adimensionalmente en función del tiempo

X	0.3156	0.4967	0.6376	0.7866	1.0
D	32	50	64	79	100

En virtud de que el fertilizante debe ser proporcionado oportunamente a los cultivos, el calendario se desfasa, es decir para los primeros 32 días del ciclo de fertilización, la planta debe haber consumido los primeros 40 kg, estos deben proporcionarse el día uno del ciclo, los siguientes 40 kg, se proporcionaran a los 32 días, de tal manera que el calendario de aplicación se desfasa una fecha y queda como se ilustra en el Cuadro 26.

Cuadro 27. Programación final de las dosis de fertilizantes en función de los días de crecimiento del cultivo.

Aplicación	40	40	40	40	40
Días	1	32	50	64	79

Prevención y combate de problemas de obstrucción de goteros

La obstrucción de goteros es un problema común en los sistemas de riego localizados, cuando no se tiene cuidado en su prevención, y que una vez que se presenta el problema se tiene que sustituir a los goteros tapados.

Las causas que originan el taponamiento de los goteros pueden ser debidas a la incrustación de materiales sólidos de naturaleza orgánica o inorgánica (arena, algas, restos vegetales y animales), otra causa es el usar agua de riego con altos contenidos de carbonatos y bicarbonatos los cuales se precipitan en la tubería o en los orificios de los goteros obstruyéndolos parcial o totalmente.

Para el primer caso, cuando el taponamiento de los goteros se debe a la incrustación de materiales sólidos de naturaleza orgánica o inorgánica, el problema debe prevenirse por medio de una filtración adecuada del agua de riego, utilizando filtros de arena, cuando el agua contenga materiales orgánicos, arcilla y/o limos, y un hidrociclón cuando contenga arena. Para el caso que se presenten cantidades exageradas de carbonatos y bicarbonatos, el taponamiento de los goteros debe prevenirse aplicando con el tanque fertilizador a la red de riego, una solución de ácido clorhídrico 0.5 N hasta completar 2 L ha^{-1}. La aplicación debe hacerse en forma periódica durante el ciclo vegetativo del cultivo y durante los últimos 10 ó 15 minutos de riego de tal manera que la solución ácida se quede dentro de la tubería y actúe disolviendo las pequeñas incrustaciones que se empiezan a formar dentro de los goteros.

Debe tomarse en cuenta que la prevención de taponamiento es un aspecto esencial para la operación adecuada de un sistema de riego por goteo ya que una vez tapados los goteros, lo indicado es sustituirlos por otros nuevos, lo que ocasiona el encarecimiento del equipo.

Aplicación de fertilizantes a través del sistema de riego por goteo

Las plantas, al igual que los seres humanos, requieren alimento para su crecimiento y desarrollo. Este alimento está compuesto de ciertas sustancias químicas, referidas como elementos fertilizantes de las plantas. Los principales nutrimentos que se deben incorporar al suelo como fertilizantes son nitrógeno, fósforo y potasio, así como aquellos que las plantas requieren en pocas cantidades y se les llama elementos menores, tales como: hierro, manganeso, magnesio, calcio, zinc y boro.

Una manera de aplicarlos a través del sistema, es el de utilizar el agua de riego para el transporte de nutrientes obteniéndose una mayor uniformidad de distribución y con las siguientes ventajas:

-Los nutrientes se dosifican adecuadamente por lo que se evitan pérdidas por lixiviación o precipitación.

-Se puede aplicar fertilizante a través de todo el ciclo.

Los fertilizantes comerciales fueron diseñados para su aplicación en riego por gravedad y su uso en sistemas de riego a presión queda condicionado a un o varios tratamientos previos.

Los compuestos químicos simples o complejos que tienen posibilidades como fertilizantes, para su uso en riego a presión se consideran dentro de éstos, aquellos que aportan en forma directa algún nutrimento mineral a la planta y los que mejoran las condiciones del terreno. Además deben tener las siguientes características:

-Alta solubilidad en agua.

-No contener substancias insolubles que no puedan filtrarse o separarse con facilidad.

-No formar substancias de baja solubilidad que precipitan en el sistema.

-No contener substancias o elementos secundarios tóxicos que tienden a contaminar los suelos, las aguas de drenaje y en general el medio ambiente.

-Ser económico.

-Poder manejarse con facilidad sin riesgos considerables.

-No dañar los diferentes componentes de los sistemas de riego.

-Ser móviles en los suelos.

Cuando un compuesto o mezcla no llene enteramente las condiciones anteriores, no se debe rechazar completamente pues con frecuencia es posible corregir sus defectos sin grandes complicaciones, por ejemplo; predisolviendo, decantando, filtrando, centrifugando, etc.

Características de los fertilizantes agrícolas más comunes

a) Nutricionales

- **Nitrogenados**

***Amonio anhidro (82% N).** Es altamente volátil en aguas alcalinas, favorece la precipitación de carbonatos y bicarbonatos. En aguas duras (ricas en calcio y magnesio) se favorece a la incrustación de tuberías y goteros, lo cual puede controlarse inyectando simultáneamente ácido muriático que disuelve los precipitados. Los costos de fertilización aumentan con el tratamiento anterior.

***Sulfato de Amonio (21% N)**. Es un material cristalino de alta pureza, solubilidad en el agua del orden de 60 a 100 g / 100 ml dependiendo de la temperatura. Su reacción es ligeramente ácida, su manejo es fácil y puede inyectarse a los sistemas de riego a través de tanques neumáticos o bien como bombas dosificadoras. No deja residuos nocivos.

***Nitrato de Amonio (33.5% N).** Es altamente soluble en agua, disolviéndose de 120 a 870 g /100 ml de agua, dependiendo de la temperatura. Es altamente higroscópico, como fertilizante contiene residuos insolubles.

Se requiere almacenar el producto en un lugar seco, en sacos de plástico hermético y predisolverse para decantar y filtrar residuos insolubles.

***Urea**. Se comercia con 45 a 46% de nitrógeno es ordinariamente higroscópico y difícil de manejar pero en forma comercial viene granulada y no tiene grandes complicaciones su manejo. Es muy soluble en agua y no deja residuo.

-Fosfóricos

***Superfosfato Triple**. Contiene 45% de P_2O_5, tiene muy baja solubilidad en agua, aunque es totalmente soluble pero su forma comercial como fertilizante deja gran cantidad de residuos.

Las aguas que contengan altas concentraciones de calcio, favorecen la formación de fosfatos dicálcicos, los cuales llegan a precipitar en las tuberías y demás elementos del sistema. Su aplicación queda condicionada a la predisolución, decantación y filtración de residuos insolubles.

-Potásicos

Cloruro, sulfato, nitrato de potasio y sulfato doble de potasio y

magnesio.

KCL (50% K_2O) Solubilidad en agua 35 a 57 g/100 ml.

K_2SO_4 (50% K_2O Solubilidad en agua 7 a 24 gr/100 ml.

KNO_3 (46.5% K_2O) Solubilidad en agua 13 a 250 g/100 ml.

K_2SO_4, $MgSO_4$ (22 % K_2O) Solubilidad en agua de 13 a 250 g/100 ml.

Todos los compuestos son cristalinos, solubles en agua, dejan poco residuo en las tuberías y demás elementos del sistema. Los dos compuestos preferidos son los cloruros y los nitratos, siendo el primero el más económico.

Romero (1976), en el Laboratorio de Ingeniería de Riego y Drenaje de la SARH determinó la solubilidad de los diversos fertilizantes la cual se muestra en la Figura 44.

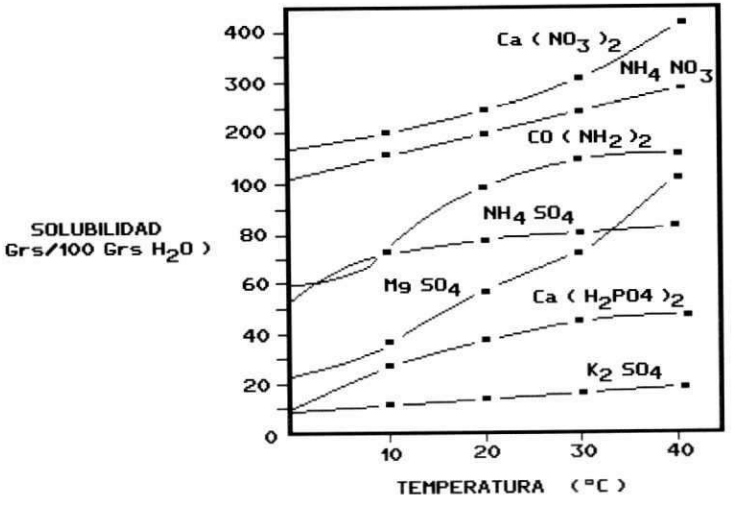


Figura 44. Curvas de solubilidad de fertilizantes agrícolas

Fertilizantes Líquidos y/o Mejoradores

Todos los ácidos (acido clorhídrico, sulfúrico, fosfórico y nítrico) son de alta solubilidad en agua y son aplicables a suelos alcalinos con problemas de sodio; como mejoradores más que como fertilizantes, sin embargo también se utilizan con este fin los fertilizantes líquidos ácidos, además de su función tienen la posibilidad de utilizarse como desincrustantes de los sistemas, por ejemplo de carbonatos y bicarbonatos, precipitados de hierro, en este caso se prefiere el ácido sulfúrico.

El manejo de todos los ácidos requiere medios y precauciones especiales y entrenamiento cuidadoso del personal además de tener siempre a mano, abundante agua, bicarbonato de sodio y otros elementos para atender quemaduras en caso de accidente.

En la actualidad ya se cuenta con fertilizantes líquidos, los cuales tienen como base los ácidos ya mencionados excluyendo el clorhídrico que más bien se utiliza como desincrustante.

Los fabricantes pueden elaborar sobre pedido la formulación más acorde a las necesidades del productor y para el cultivo establecido. Algunas de las formulaciones más comunes, son las siguientes:

5N - 0P_2O_5 - 0K_2O - 30S

Esta formula se utiliza como un mejorador con baja aportación de nitrógeno y alto contenido de azufre, los contenidos de ambos nutrimentos pueden variar hacia arriba o abajo respectivamente.

Otro caso puede ser la siguiente formulación:

15N - 30 P_2O_5 - 0 K_2O – 15S

Esta fórmula ya incluye el fósforo y la base de la formulación es acido fosfórico, sulfúrico y urea.

Así como estás formulaciones se pueden manejar otras que contengan potasio, calcio y/o magnesio y elementos menores.

Cuando no se cuente con fertilizantes líquidos disponibles, habrá que utilizar los sólidos bajo las siguientes formas de aplicación.

Aplicación de Fertilizantes Nitrogenados

Los compuestos nitrogenados, debido a que tienen un alto grado de solubilidad se pueden aplicar por medio del sistema, sin embargo, como prevención es recomendable disolver el fertilizante en un recipiente y posteriormente, colocarlo en el dosificador.

De acuerdo a las tablas de solubilidad de los diferentes fertilizantes nitrogenados, se presenta la cantidad mínima requerida de agua para la disolución de 1 kg del compuesto.

Cuadro 28. Solubilidad de fertilizantes nitrogenados comerciales

Compuesto	Agua mínima necesaria (L kg^{-1} de fertilizante)	Agua recomendada (L kg^{-1} de nutrimento)
Nitrato de amonio	0.67	0.85
Urea	1.05	1.30
Nitrato de calcio	0.53	0.70
Sulfato de amonio	1.35	1.70

Ejemplo:

Se requiere aplicar fertilizante nitrogenado a través del sistema utilizando una solución en concentración de 1 kg de urea por 1.5 l de agua.

Fórmula por aplicar: 100 - 60 - 00

Determinar la cantidad de agua necesaria para realizar la aplicación.

$$\frac{1 \text{ kg urea}}{0.46 \text{ kg N}} * \frac{100 \text{ kg N}}{X} = X = \frac{100}{0.46} = 217.4 \text{ kg urea}$$

$$\frac{1 \text{ kg urea}}{1.5 \text{ L agua}} * \frac{X}{217.4 \text{ urea}} = X = 1.5 * 217.4 = 326.1 \text{ L agua}$$

Aplicación del Fósforo

En cuanto a la aplicación del fósforo, se presenta un problema debido a que las fuentes de este elemento son poco solubles en agua y presentan un alto contenido de residuos inertes, por lo que su aplicación deberá efectuarse mediante tratamientos previos.

Las fuentes principales de fósforo son el superfosfato triple de calcio y fórmulas combinadas como la 18-46-00, las cuales para aplicarlas a través del sistema es necesario sujetarlas a un pre tratamiento en la siguiente forma.

Se trata de solubilizar la mayor cantidad de fósforo posible con H_2SO_4, recuperándose como H_3PO_4; la reacción se puede describir como sigue:

$$Ca(H_2PO_4)_2 + H_2SO_4 \rightarrow CaSO_4 + 2H_3PO_4$$

Superfosfato triple de calcio + Acido sulfúrico → Yeso + Acido fosfórico

El tratado del material sólido con solución ácida al 8 por ciento utilizando 3.5 L de agua más 280 ml de H_2SO_4 por kg de superfosfato triple de calcio. Se agita fuertemente, se deja sedimentar durante 24 horas y se decanta el líquido obtenido. Posteriormente se aplica un lavado al sedimento, éste se deja a que precipite durante otras 24 horas, después se juntan las soluciones obtenidas y ya están listas para aplicarse. Esta solución se deberá preparar únicamente en tanques recubiertos o bien en recipientes de plásticos, debido a que se emplean soluciones ácidas que son corrosivas, que pueden solubilizar en un momento dado al fierro y tener problemas en la inyección por la precipitación de éste, dentro de las tuberías o goteros.

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE RIEGO POR GOTEO

A. Evaluación Económica de Proyectos de Riego

Para la irrigación de tierras agrícolas, es necesario resolver el cómo, cuándo y cuánto regar. Normalmente para resolver el cómo regar existen varias alternativas factibles, de las cuales el usuario técnico tiene que elegir, es el caso de alternativas mutuamente excluyentes.

En estos casos debe usarse el criterio económico, tomando en cuenta un horizonte de planeación apegado a la realidad y considerando, lo que los economistas llaman el "valor tiempo del dinero" que no es otra cosa que la de considerar el interés (interés compuesto) producido por el dinero utilizado, ya que a cualquier empresario le interesa conocer la productividad de su capital invertido, en comparación de alternativas de inversión seguras, como puede ser cuentas de ahorro en un banco.

Para lograr una comparación entre diferentes alternativas existen criterios ideados por los economistas, tales como: el valor presente neto, equivalente al costo anual uniforme, relación beneficio costo y tasa de retorno interno, que son herramientas útiles en la evaluación de proyectos en general.

Debe hacerse notar que la agricultura es una actividad que depende de factores aleatorios y de control poco precisos y que algunos factores son intangibles; por esta razón, es interesante poder realizar análisis de sensibilidad al suponer variaciones factibles en factores como costos, beneficios o vida útil.

Todo lo anterior hace pensar que la evaluación económica debe sistematizarse para obtener mejores decisiones en el como regar.

1.Objetivos

Este apartado tiene el objetivo de presentar ciertas técnicas econó-

micas a los ingenieros especialistas en Irrigación, con la finalidad de que puedan utilizarlas en su toma de decisiones al elegir un proyecto o sistema de riego. Estas técnicas son:

a) Cálculo del valor presente neto para cada alternativa.

b) Cálculo del equivalente neto anual uniforme.

c) Cálculo de la relación beneficio costo.

d) Cálculo de la tasa de retorno interno.

2. Definiciones

Valor tiempo del dinero

Se puede definir como el costo por usar el dinero o como el aumento de capital de una inversión dada, al transcurrir el tiempo. Fernández *et al* 1978, mencionan que este valor tiene dos componentes, siendo éstas la productividad y la incertidumbre.

Interés Compuesto

Es el incremento de capital invertido, con la condición de que los intereses no pagados generen intereses. Lógicamente, se aplica a más de un período. La expresión matemática que relaciona el capital original (P) y el final (F), con una tasa de interés (i) y un período de tiempo (n), es:

$$F = P\,(1+i)^n \qquad 45$$

Fernández *et al.* (1978), definen el interés de la manera siguiente: "Es una medida del incremento entre la suma invertida o prestada y la cantidad final que se obtiene".

Tasa de rendimiento mínima atractiva

Es la tasa de interés aceptada por el inversionista y que, deberá ser mayor que una tasa de interés de inversión segura; es común tomar la tasa de interés a la que prestan dinero los bancos.

Evaluación de proyectos

Esta actividad queda comprendida dentro de la ingeniería económica, o economía para la ingeniería, la cual constituye una serie de herramientas matemáticas, que permiten evaluar los aspectos económicos de los proyectos.

Estos proyectos normalmente constituyen varias alternativas para lograr un objetivo deseado, que se deben comparar en unidades homogéneas.

En evaluación de proyectos, es importante distinguir dos puntos de vista de comparación:

El primero es el privado, en donde es de primordial importancia maximizar el ingreso neto, y el segundo el público, en donde generalmente se persiguen objetivos sociales.

También deben mencionarse dos tipos de análisis:

El análisis económico, el cual estudia la productividad de una inversión de manera cuantitativa.

Análisis financiero

Éste estudia la factibilidad de realizar la inversión, i.e., desde el punto de vista de lograr financiamiento y recuperación.

a) Alternativas.

Constituyen las diferentes formas de lograr un objetivo. Pueden existir alternativas complementarias y mutuamente excluyentes. El objetivo de la evaluación económica, es tomar la decisión de la(s) alternativa(s) más remunerativa(s).

b) Diagrama de flujo del dinero.

Esta es una herramienta para representar el flujo del dinero en una escala de tiempo, que principia en el año cero.

Los ingresos (I) o beneficios se representan con flechas hacia arriba (positivas) y los egresos (E) o costos con flechas hacia abajo (negativos). Un ejemplo se representa en la siguiente figura 45.

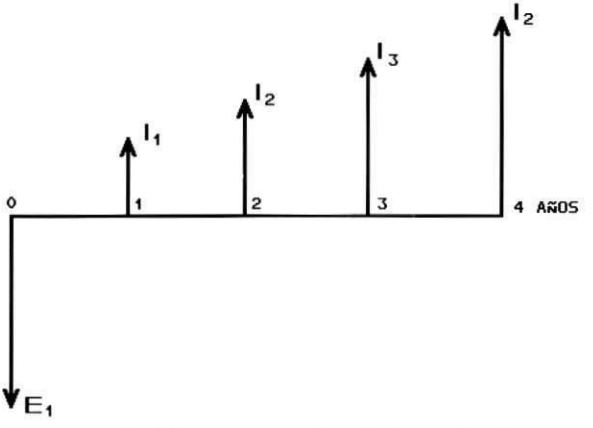


Figura 45. Diagrama de flujo del dinero

Aquí es importante mencionar algunos conceptos, como son:

-Convención de fin de año.

Se refiere a que, el valor tiempo del dinero se afecta hasta el final del año o tiempo de capitalización considerado.

-Variables.

Las variables que intervienen en el diagrama de flujo del dinero, pueden ser incógnitas o valores conocidos.

-Valor presente (P)

Se refiere al capital o inversión inicial que también le llaman principal y está colocado en el año cero del diagrama de flujo del dinero.

-Valor futuro. (F).

Se refiere a cualquier costo o beneficio que sucede a cualquier año mayor de cero.

-Anualidad (A). Son costos o beneficios que suceden uniformemente distribuidos a partir del año A en el diagrama de flujo.

-Gradiente (G).

Son los costos o beneficios que crecen en forma proporcional a partir del año 2.

-Horizonte de planeación (N).

Se refiere al número de años considerados en el análisis.

-Tasa de interés (i).

Es el interés expresado en el % en la unidad de tiempo o por un período, en los análisis frecuentes se considera como tasa de rendimiento mínima atractiva, también se define como el precio por usar el dinero.

Para ilustrar lo anteriormente definido se considera el siguiente ejemplo (fig. 46):

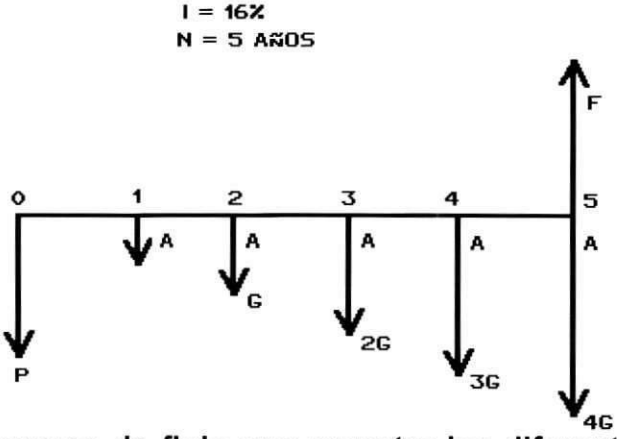


Figura 46. Diagrama de flujo que muestra las diferentes variables antes mencionadas

Como es importante conocer las fórmulas para convertir de un valor a otro sin olvidarnos del valor tiempo del dinero (interés compuesto), se mencionan aquí las fórmulas más usuales. Es conveniente aclarar la nomenclatura o simbología utilizada de esta manera:

(A/P, i, n)

La expresión anterior expresa el factor de conversión de un valor presente (P) a un valor uniforme (A), considerando una tasa de interés (i) en (n) años.

Hecha la aclaración anterior, se presentan las fórmulas 30 a la 37 de los factores de conversión más importantes.

3. Valores Económicos

Para realizar la evaluación de proyectos es necesario contar con ciertos valores económicos, tales como el conocimiento de los beneficios, los costos, vida útil y tasa de interés, que en muchas ocasiones se tiene incertidumbre en su estimación.

Estos valores pueden ser de diferentes tipos, tales como:

Valores de mercado, los cuales como su nombre lo indica son los que prevalecen en el mercado en el momento de la evaluación; valores imputables, estos tipos de valores se refieren a datos fijados o establecidos por alguna institución o autoridad; valores intangibles, se refieren a valores que son de difícil cuantificación desde el punto de vista de su valor en dinero; valores históricos, son datos que surgen de las estadísticas de años anteriores a la evaluación, pero que pueden ser buenos estimadores; valores futuros, son datos obtenidos mediante técnicas estadísticas que tratan de extrapolar o predecir resultados.

Debe mencionarse también el efecto en los valores económicos de la inflación. Los economistas aplican coeficientes deflacionarios para analizar las alternativas; esto es de gran importancia cuando se analizan proyectos que mezclan actividades de campos diferentes (agrícola e industrial) sin embargo, normalmente se considera que la inflación afecta tanto a los costos como a los beneficios en la misma proporción, de tal manera que simplifica el análisis si se omite este efecto.

4. Parámetros de comparación

Los parámetros más utilizados en la evaluación de proyectos son:

a) Valor presente neto (VPN). Se refiere a la suma algebraica de todos los ingresos y egresos actualizados, es decir, afectados por la tasa de interés correspondiente y trasladado al año cero.

La regla de decisión es: VPN > 0.0 Aceptable

b) Equivalente anual uniforme (EAU). Como su nombre lo indica, la suposición de que los costos y/o beneficios suceden uniformemente distribuidos en todo el horizonte de planeación, lógicamente afectado de la tasa de interés correspondiente.

La regla de decisión es: EAU > 0.0 Aceptable

c) Relación beneficio costo (B/C). Es el cociente de los valores presentes positivos y los negativos, es decir, ingresos entre egresos, transformados a valor presente.

La regla de decisión es: B/C > 1.0 Aceptable

d) Tasa de retorno interno (TRI). Es la tasa de interés con la cual los ingresos y los egresos actualizados son iguales.

La regla de decisión es: TRI > TRMA Aceptable

Donde TRMA es la tasa de rendimiento mínima atractiva.

Factor de monto compuesto:

$$(F/P, i, n) = (1+i)^n \qquad 46$$

Factor de descuento:

$$(F/P, i, n) = \frac{1}{(1+i)^n} \qquad 47$$

Factor de conversión a valor presente de una serie uniforme:

$$(P/A, i, n) = \frac{(1+i)^n - 1}{i\,(1+i)^n} \qquad 48$$

Factor de amortización:

$$(P/A, i, n) = \frac{i\,(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \qquad 49$$

Factor de monto compuesto de anualidades:

$$(F/A, i, n) = \frac{(1+i)^n}{i} \qquad 50$$

Factor de renta periodica o monto de renta agotable:

$$(A/P, i, n) = \frac{i}{(1+i)^n - 1} \qquad 51$$

Factor del valor presente de un gradiente:

$$(P/G, i, n) = \frac{(1+i)^n - 1}{i^2 (1+i)^n} - \frac{n}{i (1+i)^n} \qquad 52$$

Factor de la serie uniforme de un gradiente:

$$(A/G, i, n) = 1/i - \frac{n}{(1+i)^n - 1} \qquad 53$$

5. Ejemplo numérico

Considere un proyecto de riego por goteo simplificado, en los que se tienen los datos en miles de pesos. El diagrama de flujo de dinero se presenta en la Figura 47, (flechas hacia arriba son beneficios, hacia abajo son costos); la tasa de interés anual es de 18 %. Se calculan los parámetros económicos de comparación y se concluye si el proyecto se justifica o no económicamente.

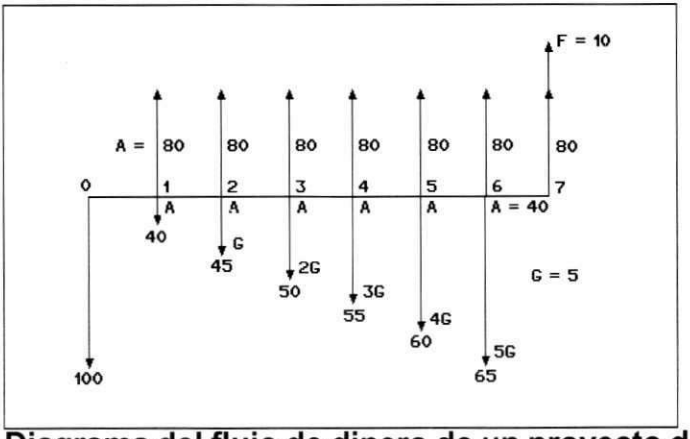


Figura 47. Diagrama del flujo de dinero de un proyecto de Riego por Goteo

Cálculos:

Se Transforman los egresos a valor presente:

E = -100 - 40 (P/A, 0.18, 6) -5(P/G, 0.18, 6)

E = -100 – 40 (3.497606) – 5 (7.083407)

E = -275.321275

Debe aclararse que aquí se han utilizado las fórmulas 48 y 52.

Transformando los ingresos a valor presente:

I = 80(P/A, 0.18, 7) + 10(P/F, 0.18, 7)

= 80 (3.811528) + 10(0.313925)

= 304.92224 + 3.133925

I = 308.065

En este caso se utilizaron las fórmulas 48 y 47.

El ingreso neto actualizado o valor presente neto es:

VP = IN = I + E = 308.06 -275.32 = +32.74 > 0.0

La relación beneficio costo será:

$$B/C = \frac{308.06}{275.32} = 1.1189 > 1.0, \text{ entonces;}$$

El equivalente anual uniforme:

EAU = VP(A/P, 0.18, 7) = 32.74 x 0.26236197 = 8.59

EAU = 8.59 > 0.0; por lo tanto la tasa de retorno interno

La condición es de que I=E, por lo tanto, se procede a un primer tanteo.

Primer tanteo: i = 0.30

E = -100-40 (P/A, 0.30, 6) - 5(P/G, 0.30, 6)

E = -100-40 (2.6427) -5 (4.666)

E = -229.038

I = 80 (P/A, 0.30, 7) + 10 (P/F, 0.30, 7)

I = 80 (2.8021) + 10 (0.1594)

I = 225.76

VP = -3.278; como este valor no es cero, se procede a realizar otro tanteo, haciendo una interpolación lineal; considerando el primer tanteo y el realizado con la tasa mínima atractiva (TMA).

Interpolación (Fig. 48):

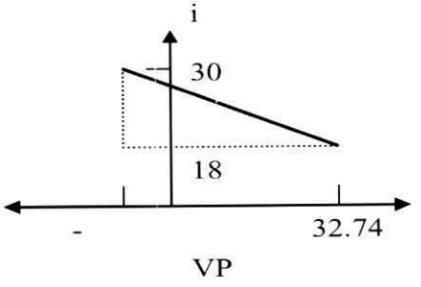


Figura 48. Conceptualización de la interpolación entre los valores (VP, i)

Por triángulos semejantes la interpolación es:

$$i = \frac{(32.74 - 0)(30 - 18)}{(32.74 - (-3.278))} + 18 = 28.91$$

Por lo tanto se puede elegir para un segundo tanteo;

Una i = 0.28

Segundo tanteo: i = 0.28

E = -100-40(2.7594) -5(4.9827)

E = -235.289

I = 80(2.9370) + 10 (0.1776)

I = 236.74

Como:

VP = 236.74 - 235.289 =1.451 > 0.0

Entonces,

Se propone un tercer tanteo: i = 0.287

E = -100-40(2.7176) - 5(4.8686) = -233.047

I = 80 (2.886) + 10(0.17098) = 232.80

VP = 232.80 - 233.47 = -0.2492 < 0

Se puede aceptar como TRI = 0.286

NOTA: Los valores que aparecen dentro del paréntesis se calculan con ayuda de las fórmulas de los factores de conversión.

Conclusiones:

VP = 32.74 > 0.0

B/C = 1.1189 > 1.0

EAU = 8.59 > 0.0

TRI = 0.286 > 0.18

De lo anterior se puede concluir que el proyecto analizado es redituable económicamente.

Evaluación de eficiencias en sistemas de riego por goteo

A diferencia de los sistemas de riego por superficie, donde el agua fluye sobre el terreno produciendo patrones de humedecimiento que están determinados por el tiempo en el que una lámina de agua está en movimiento vertical, en los sistemas de riego por goteo el patrón de mojado depende de la cantidad de agua aplicada la que a su vez depende de la presión con que se aplica, siempre y cuando no ocurra flujo superficial por exceso de aplicación. Debe recordarse que el flujo superficial se produce cuando la tasa de aplicación es superior a la tasa de infiltración del agua en el suelo. La variabilidad del patrón de mojado se puede cuantificar de diferentes maneras, generando índices de calidad del proceso del riego o eficiencia del mismo. Esto permite tomar decisiones para mejorar la operación del sistema incrementando su rentabilidad, ya sea por mayores rendimientos, mejor calidad de cosecha, ahorro de volúmenes de agua o cualquier combinación de lo anterior.

Una vez instalado un sistema de riego el operario debe evaluar las características hidráulicas importantes conforme a lo proyectado en el diseño, como presión de operación (Ho) que contemple que las pérdidas de carga hidráulica permisibles, no mayores a un 20 por ciento, para que dicha diferencia corresponda a un decremento de caudales en la emisión de 10 por ciento, y que ambos diferendos permitan que el sistema hidráulico proporcione una uniformidad de aplicación del agua del 90 por ciento en las unidades de riego.

Desde un punto de vista más relacionado con la productividad del recurso, los parámetros indicadores del desempeño del riego son: la uniformidad de riego o emisión, la eficiencia de aplicación, tanto relativa (Ea) como absoluta (Eaa), la eficiencia de almacenamiento o requerimiento (Er), la eficiencia de captación (Ec), la cantidad de agua perdida por percolación (P) y el déficit de aportación de riego (D).

Uniformidad de riego o emisión

Este parámetro se refiere a las especificaciones técnicas, y está relacionado con la diferencia de presiones. Esto es, todo sistema de riego a presión se proyecta para que la diferencia de volúmenes o láminas de riego en dos puntos extremos en una línea de aplicación tengan una diferencia no mayor de 10 %. En términos prácticos esto garantiza que el agua suministrada tenga al menos un 90 % de uniformidad, en riego por goteo se denomina uniformidad de riego o emisión y se evalúan los volúmenes de agua suministrados gota a gota directamente al suelo y su resultado indica el porcentaje de variación en la lámina o volumen de agua aplicada a la superficie del suelo de una unidad de riego, se obtiene mediante el aforo de 50 goteros regularmente espaciados en una unidad de riego aplicando la expresión siguiente (Keller, 1987; Burt y Styles, 1994):

$$UR = 100(1 - 1.27\ CV)\frac{Y}{X} \qquad 54$$

Donde UR es la Uniformidad de riego o emisión (%), CV es el Coeficiente de Variación (%), cuando la emisión del caudal a un cultivo esta formada por un conjunto de goteros, lo que es común en árboles, dicho coeficiente se expresa por Vs = CV/np, sustituyendo dicho valor por (CV) en la expresión (1), (np) es el número de emisores por planta, Y es la descarga media del 25 % de valores con menor aforo (12 goteros) ($L\ h^{-1}$); X es la descarga media del sistema (50 goteros) ($L\ h^{-1}$).

El valor resultante del Coeficiente de Variación se puede utilizar para clasificar los emisores como excelente, bueno, marginal, pobre e inaceptable de acuerdo a la forma de emisión. El Cuadro 29 indica los valores para establecer el nivel de desempeño del sistema de acuerdo a este criterio. Por otro lado, algunos fabricantes proporcionan el CV de su emisor certificado por sus laboratorios.

Cuadro 29. Clasificación de emisores de acuerdo al coeficiente de variación (CV) (Merriam and Keller, 1978; Burt y Styles, 1994; Peña, 1997, Herrera *et al* 2000)

Clasificación (calidad)	Goteo y Micro aspersión	Cintilla
Excelente	CV < 0.04	CV < 0.1
Bueno	0.04 < CV < 0.07	0.1 < CV < 0.2
Marginal	0.07 < CV < 0.11	
Pobre	0.11 < CV < 0.15	0.2 < CV < 0.3
Inaceptable	CV > 0.15	CV > 0.3

Algunos factores topográficos locales limitan el funcionamiento de los emisores y se refleja en valores relativamente bajos de uniformidad de emisión. Dichos factores normalmente no se pueden modificar o resulta demasiado costoso hacerlo, por lo tanto la uniformidad de emisión bajo determinadas condiciones locales que se recomienda se muestra en el Cuadro 30.

Cuadro 30. Rangos recomendados de la uniformidad de emisión (UR) para el diseño de riego por goteo, considerando las características topográficas del terreno. (Merriam and Keller, 1978)

Para emisores con espaciamientos grandes y cultivos perennes	%
Topografía uniforme	90 < UR < 94
Topografía ondulante o excesiva	88 < UR < 92
Para emisores de espaciamientos menores de 1.8 m en cultivos anuales y perennes	%
Topografía uniforme	80 < UR < 90
Topografía ondulante o excesiva	84 < UR <90
Para cintillas en cultivos anuales	%
Topografía uniforme	80 < UR < 90
Topografía ondulante o excesiva	70 < UR < 85

Eficiencia de aplicación relativa (Ea)

Este parámetro cuantifica la cantidad de agua que se almacena en la profundidad radicular deseada con respecto a la cantidad de agua aplicada. Para cuantificarla, el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos utiliza la expresión 55 (Hansen, 1960).

$$Ea = \frac{Za}{Z} * 100\% \qquad 55$$

Donde Za es la lámina de agua promedio almacenada en la zona de raíces por efecto del riego (mm) y Z la lámina de agua total aplicada en el riego (mm).

Eficiencia de aplicación absoluta (Eaa)

Indica la eficiencia real de uso del agua. Se ilustra con la expresión 56, propuesta por Merriam y Keller (1978).

$$Eaa = Ea * UR \qquad 56$$

Donde UR se define como la uniformidad de riego.

La eficiencia de aplicación absoluta es similar a la eficiencia de aplicación global que se aplica en los sistemas de riego por superficie a nivel parcelario. Para este caso en los sistemas de riego presurizados, las eficiencias de conducción y distribución se asumen que son equivalentes o próximas a 100% o igual a la unidad ya que se conducen a través de tuberías.

Cada sistema de riego presurizado tiene una eficiencia determinada y su elección dependerá del tipo de suelo y de vegetación, así por ejemplo, un riego por goteo puede llegar a una eficiencia global muy alta hasta de 95 por ciento, mientras que en aspersión desciende al 70 a 80 por ciento. Se estima que en sistemas de aspersión o microaspersión de gotas finas se puede llegar a perder hasta un 20 por ciento por evaporación directa a la atmósfera. En el Cuadro 31 se muestran las eficiencias globales o reales para cada sistema de riego a presión.

Cuadro 31. Eficiencia de riego real o global que se pueden alcanzar con los diferentes sistemas de riego presurizados (Salomón, 1990)

Sistema de riego	Eficiencia (%)
Portátil	65-75
Lateral con ruedas (Power roll)	65-75
Cañón viajero	60-70
Pivote central	75-90
Avance frontal	75-90
Fijo	70-80
Lateral móvil de bajo volumen	80-95
Goteo	90-95
Microaspersión	90-95

Eficiencia de almacenamiento o requerimiento (Er, %)

Hansen (1960), cita que esta eficiencia da una aproximación de los excesos de riego (Percolación) o deficiencias (Déficit) al aplicar el agua, con relación a la cantidad de agua requerida en la profundidad de las raíces del cultivo. Para su evaluación, dicho parámetro se calcula con la ecuación 57.

$$Er = \frac{Za}{Zr} * 100 \qquad 57$$

Donde Za ya fue definida, Zr es la lámina de agua requerida en la zona de raíces (mm).

Eficiencia de percolación (P)

Este término se define como la cantidad de lámina percolada mas allá de la profundidad de las raíces y que no puede ser usada por los cultivos. Este parámetro no únicamente se consideran como perdidas de agua, sino también como probables pérdidas de nutrientes y consecuentemente con potencialidad de contaminación de los acuíferos. Se expresa en porcentaje y es estimada con ecuacion 58 (Anyoji y Wu, 1994).

$$P = (100 - Ea) \qquad 58$$

Donde Ea ya fue definida anteriormente.

Déficit de riego (D)

Se denomina déficit de riego cuando la profundidad de las raíces es irrigada en forma deficiente, y es expresada en porcentaje. Es el complemento de la eficiencia de almacenamiento o requerimiento. Para su estimación se utiliza la expresión 59, propuesta por Anyoji y Wu (1994).

$$D = (100 - Er) \qquad 59$$

Donde Er es la eficiencia de almacenamiento o requerimiento.

Relaciones entre Ea y Er con la uniformidad de riego o Distribución

En la Figura 49 se ilustran los índices correspondientes a las eficiencias Ea, Er, y UCC. En la figura 56(C), el índice de percolación (P) es excesivo y corresponde al área achurada en diagonal izquierda por debajo de la línea horizontal punteada, que es el limite de la profundidad de las raíces; caso contrario se muestra en (A), el déficit (D) está por encima de dicha línea. En cambio el esquema B, se considera que los índices de eficiencia son aceptables.

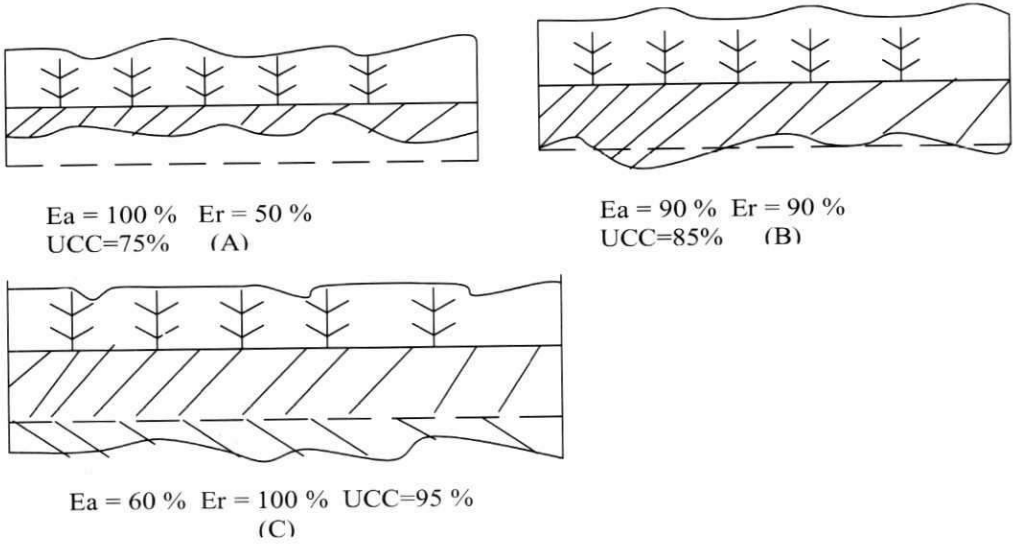


Figura 49. Indices de eficiencia de aplicación y requerimiento relacionados con la uniformidad de riego (Hansen, 1960; Luna. 1988)

Eficiencia de captación (Ec, %)

Este parámetro es un indicador de la cantidad real del agua aplicada sobre la superficie del suelo por un sistema de riego presurizado. Se estima con la relación entre el volumen captado y el volumen bombeado durante el riego (Allen, 1991).

$$Ec = \frac{Vi}{Vs} * 100 \qquad 60$$

Donde: Vi es el volumen captado en el área irrigada (m^3) y Vs es el volumen descargado por el sistema o volumen bombeado durante el riego (m^3).

Procedimiento de campo para la evaluación de un sistema de riego por goteo

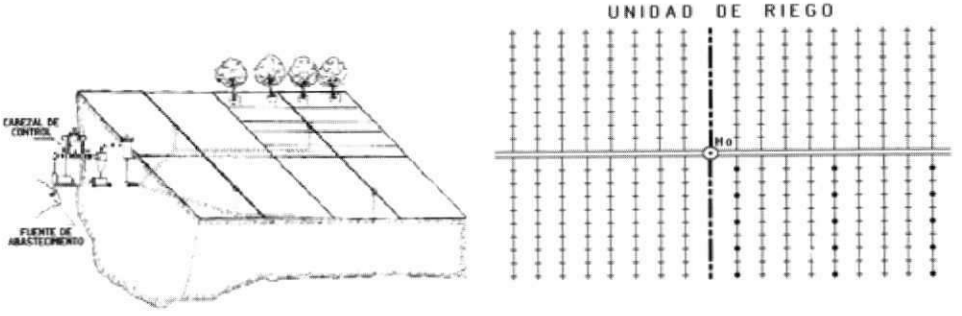
Como fue mencionado antes, los componentes básicos de un sistema de riego por goteo son (1) las unidades de riego, (2) las tuberías de conducción y (3) el cabezal de control (Figura 50). El proceso de evaluación hace necesario que en primer lugar, se verifique la presión de operación (Ho) al centro de la unidad (Figura 50b) y después el diferencial de presión entre el gotero cercano a dicho punto (i) y el más alejado (f). Posteriormente, en dicha sub-unidad se procede a recolectar el volumen de 50 goteros distribuídos geométricamente tal y como se muestra en la Figura 50b. Para realizar la evaluación se procede de la siguiente manera:

a. En la sub-unidad se selecciona la primera y última línea de riego. Se aforan el primer y último gotero. Posteriormente se aforan 11 goteros adicionales igualmente espaciados entre ellos en cada línea regante citada, para hacer un total de 26 goteros en las dos líneas.

b. Con el mismo procedimiento, se seleccionan otras dos líneas intermedias para aforar 12 goteros en cada línea regante para un total de 24 goteros.

c. Con el total de la muestra de 50 goteros se procederá a realizar la estimación de las diferentes eficiencias para concluir con la evaluación.

d. Se Usa una probeta de 100 cm^3 y un cronómetro. El volumen (cm^3) captado en un tiempo de 36 s, se divide entre 10 para obtener el gasto (L h^{-1}). Con estos datos se obtiene la uniformidad de riego o emisión, al utilizar la Ecuación 54.



a.- Sistema de riego por goteo. b.- Unidad de riego.

Figura 50. Sistema de riego por goteo y su unidad de riego.

Ejemplo de evaluación de la uniformidad de riego en un sistema goteo-cintilla

El Cuadro 32 muestra valores de aforo (Q, en litros por hora, L h^{-1}) en 50 puntos de emisión en un sistema de riego instalado en el CENID RASPA en un módulo demostrativo con el cultivo de chile jalapeño; el procedimiento de recolección de muestras fue explicado anteriormente. De esta información se desprende que el gasto medio del 25 por ciento de valores con menor aforo es 0.52 L h^{-1}, el gasto medio del muestreo es 0.59 L h^{-1}, la desviación estándar 0.06 L h^{-1}. El coeficiente de variación que resulta es de 10 por ciento y la uniformidad de emisión, 76.95 por ciento (Ecuación 54). De acuerdo al valor del coeficiente de variación, el funcionamiento del sistema se clasifica como BUENO (Cuadro 29), pero la uniformidad de

riego es ligeramente inferior a lo deseable. Estos resultados se debieron a fugas que se observaron en la conexión de las líneas regantes, por lo que se debe realizar otra evaluación una vez corregido este problema.

Cuadro 32. Valores de aforo (Q, L h^{-1}) de 50 emisores en un sistema de riego por goteo tipo cintilla (Burt y Styles, 1994)

Emisor	Q	Emisor	Q	Emisor	Q	Emisor	Q	Emisor	Q
1	0.6	11	0.74	21	0.52	31	0.58	41	0.6
2	0.6	12	0.65	22	0.55	32	0.65	42	0.52
3	0.56	13	0.75	23	0.5	33	0.58	43	0.6
4	0.55	14	0.55	24	0.5	34	0.6	44	0.7
5	0.65	15	0.58	25	0.6	35	0.6	45	0.5
6	0.65	16	0.6	26	0.6	36	0.6	46	0.55
7	0.5	17	0.55	27	0.6	37	0.58	47	0.58
8	0.74	18	0.58	28	0.55	38	0.53	48	0.55
9	0.65	19	0.57	29	0.6	39	0.56	49	0.5
10	0.75	20	0.6	30	0.58	40	0.64	50	0.55

Evaluación agronómica de sistemas de riego por goteo

La evaluación de un sistema de riego por goteo desde el punto de vista agronómico implica detectar la eficiencia del funcionamiento del sistema en cuanto al tipo de cultivo, demandas de agua por el cultivo, calidad del agua, tipo de suelo, características de retención de humedad y profundidad del suelo.

1. Tipo de cultivo

En este aspecto se determina si el cultivo establecido o por establecer es adecuado al sistema de riego desde el punto de vista ecológico y de rentabilidad, debe determinarse también si la siembra fue realizada dentro del período recomendado, si la densidad de población y la variedad utilizada fue la adecuada, la separación entre plantas y surcos permite la realización de las labores de cultivo.

Observar por medio de un muestreo si la distribución vertical y horizontal de la humedad en la franja húmeda cubre la zona radical del cultivo cuando se trate de cultivos anuales y el bulbo húmedo alrededor del árbol cuando se trate de árboles frutales, también es necesario checar acerca del programa de fertilización y determinar si la aplicación se está realizando de acuerdo al cultivo, con la frecuencia requerida y en forma adecuada a través del agua de riego.

2. Demandas de agua por el cultivo

En este caso se requiere verificar si el criterio utilizado para proporcionar el agua al cultivo es el adecuado y confirmar si realmente se está cumpliendo con el programa de riego establecido, determinar también si el programa de riego cumple con proporcionar las cantidades de agua requeridas por el cultivo y con la frecuencia de riego necesaria. Para el caso de altos contenidos de sales en el agua de riego, considerar un porcentaje de sobre riego para evitar fluctuaciones drásticas de contenidos de humedad en el suelo.

3. Tipos de suelo

Se conoce que la distribución de la humedad y la capacidad de absorción de agua por el suelo dependen de la velocidad de infiltración y del movimiento capilar, y que estas características varían con la textura. La separación entre goteros depende de tales características, por lo tanto la evaluación consistirá en observar si esta separación es adecuada para propiciar la distribución uniforme y continua de la humedad en la zona radicular del cultivo.

BIBLIOGRAFIA

Agricultura de las Américas 1992. Agua pura y riego por goteo. Agua y Suelo. Universidad de California, USA. 4p.

Allen, R. G., M. E. Jensen, J. L. Wright, and R. D. Burman. 1989. Operational estimates of reference evapotranspiration. Agron. J. 81:650-662.

Allen, R. G. 1991. Sprinkler pattern overlap program software catch 3D version 4-41. Department Agricultural and Irrigation Engineering. Utah State University. Logan, Utah.

Annandale, J. G. and Stockle C. O. 1994. Fluctuation of crop evapotranspiration coefficients with weather: a sensitivity analysis. Irrig. Sci. 5:1-7.

Anyoji, H. and I. P. Wu. 1994. Normal distribution water application for drip irrigation Schedules. Transactions of the ASAE. 37 (1):159 – 164.

Baca, U. G. 1991. Evaluación de proyectos. Editorial Mc Graw-Hill. México, D.F.

BID–EIAP. Fundación Getulio Vargas. 1981. Proyectos Agrícolas. Editorial LIMUSA, México D. F.

Burgueño H., F. Uribe, M. Valenzuela. 1994. La fertigación en cultivos hortícolas con acolchado plástico. Extracción de nutrientes por los cultivos de tomate y bell pepper en el Valle de Culiacán, Sinaloa México. BUESAG S.A. de C.V.

Bugueño H., J. N. Gómez, I. Montoya M. 1995. La fertigación en cultivos hortícolas con acolchado plástico. Extracción de nutrientes por los cultivos de tomate y bell pepper en el Valle de Culiacán, Sin. México. Los Análisis de savia. La movilidad de los elementos minerales.Volúmen 2. BURSAG S.A. de C.V.

Burt, Ch. M. y S. W. Styles. 1994. Irrigation efficiency and uniformity. drip and microirrigacion for trees, vines, and row crops. ITRC. Department of Agricultural Engineering. California Polytechnic State University. San Luis Obispo, California.

Burt, C. M. and S. W. Styles. 1994. Drip and microirrigation for trees, vines, and row crops (with special sections on buried drip). Irrigation Training and Research Center (ITRC). Department of Agricultural Engineering. San Luis Obispo, California.

Carvallo, G. S. 1993. Aplicación de la tasa de rentabilidad financiera en proyectos agropecuarios. In. FIRA, Boletín informativo No. 255. Volumen XXVI. Comité Editorial del FIRA. Morelia, Mich.

Catalán V. E., I. Sánchez C. y M. Villa C. 2005. Estimación de la demanda de agua de los cultivos y calendarización del riego. Aplicación computacional en línea. http://raspa1.inifap.gob.mx/riego/index.php.

Catalán V. E., I. Sánchez C., M. Villa C., M. Inzunza I. y S. Mendoza M. 2007. Programa para calcular las demandas de agua y calendarizar el riego de los cultivos. Folleto técnico No. 7. INIFAP CENID RASPA. Gómez Palacio, Durango, México.

CENAMAR (Centro Nacional de Métodos Avanzados de Riego) 1982. Memorias del VII curso de riego por goteo. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Gómez Palacio, Dgo. 362 p.

Coss, B. 1991. Análisis y evaluación de proyectos de inversión. Editorial LIMUSA–NORIEGA. México, D. F.

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.

Doorenbos J. and Pruit W. O. 1977. Crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper 24. Food and Agriculture Organization. United Nations, Rome, Italy.

Escobar M. A. 1976. Anteproyecto de Investigación sobre dosificadores de solución de Riego por Goteo y sus aplicaciones. Tesis Profesional. Gómez Palacio, Dgo. México.

Escobar A. M. A. y C.E. Ramírez C. 1978 Operación de dosificadores de soluciones (fertilizantes y otros agroquímicos) para sistemas de riego a presión. II Seminario Nacional sobre Riego por Goteo. Gómez Palacio, Dgo. pp. 135-147.

Fernández, P. O., R. F. Oyarzabal y E. Palacios V. 1978. Ingeniería Económica. Apuntes. Rama de Riego y Drenaje. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.

Flores, L. L. F. 1989. Avances en tecnología de riego. Memorias del Seminario Internacional sobre Tecnificación del riego y uso racional de la energía. FIRA-Banco de México, SARH, CFE. pp. 1–10.

Food and Agriculture Organization (FAO). 1996. Crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 33. Rome, Italy.

Food and Agriculture Organization (FAO). 1989. Irrigation water management: Irrigation scheduling. Training Manual No. 4. Rome Italy.

Gittinger, J. P. 1989. Análisis económico de proyectos agrícolas. Segundareimpresión Editorial Tecnos, S. A. Madrid, España

Gómez P., P. 1979. Riegos a Presión, Aspersión y Goteo. 2a. Edición. España.

Hargreaves, G. H. and Z. A. Samani. 1991. Programación del riego. Un manual bilingüe. Edición Edith. Las Cruces, NM. pp.86.

Hargreaves G. H. and Samani Z. A. 1982. Estimating potential evapotranspiration. J. Irrig. Drain. Div., ASCE, 108:223-230.

Herrera P. J. C., E. Peña P., J. M. González C. 2000. Operación y Evaluación de Sistemas de Riego Presurizado. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA)., Comision Nacional del Agua (CNA) p.43

IICA-CORPOCCIDENTE-FONAIAP-FUDECO-IVPEB-MAC-MARNR-MRI-VCLA. 1981. Memorias del 4o. Seminario Latinoamericano "Riego por Goteo y Riego Localizado" Barquisimeto, Venezuela,.

Inzunza I. M. y F. Mojarro D. 1994. Simulación del coeficiente de cultivo con base en unidades térmicas. Terra. 12:289-296.

Jensen M. E., Burman R. D. and Allen R. G. 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. American Society of Civil Engineers. Irrigation Water Requirements Committee of the Irrigation and Drainage Division. Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70. New York. 332 p.

Jensen, M. E. 1983. Design and operation of farm irrigation systems. An ASAE. monograph number 3. A series published by: American Society of Agricultural Engineers. Wisconsin, USA.

Keller J. 1987. Sprinkle and trickle irrigation. Department of agricultural and irrigation engineering. Apuntes de clase. Logan, Utah.

Luna, D. E. 1988. Aplicación del modelo de distribución lineal en la evaluación de los sistemas de riego por superficie. Seminarios técnicos del PRONAPA. Centro Nacional de Investigación Disciplinaria (CENIDRASPA). 5(3):47-63. Gómez Palacio, Dgo.

Luna, D. E. 1992. Automatización de los sistemas de irrigación. Seminarios Técnicos Volumen14-16. CENID RASPA-INIFAP. Gómez Palacio, Dgo.

Merrian, L. J.; J. Keller. 1978. Farm irrigation system evaluation, a guide for management. Logan, Utah. pp. 11-124.

Monteith J. L. 1981. Evaporation and surface temperature. Quart. J. R. Meteorol. Soc. 107:1-27.

Munguía, L. J., O. Martínez U. y R. Quezada M. 2003. Influencia de la temperatura de agua en el régimen hidráulico de ocho cintas de goteo de riego por goteo. XII Congreso Nacional de Irrigación. Zacatecas, México. 13–15 de Agosto. pp. 297-308.

Muñante, P. D. 1988. Indicadores para la evaluación económica de proyectos: V. A. N., B/C., N/K. y T. I. R. Definición, calculo de interpretación económica agrícola. UACH. Chapingo, Estado de México.

Ojeda B. W., I. Sifuentes E., J. González C., J. Guillen G. y Unland W.H. 1999. Pronóstico del riego en tiempo real. Centro Nacional de Transferencia de Tecnología de Riego y Drenaje. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México.

Peña P., E., M. A. Escobar A., C. E. Ramírez., D. Jaquez A., L. Moreno D. 1979. Funcionamiento hidráulico, diseño y evaluación de sistemas de riego por goteo. Boletín N°. Centro Nacional de Métodos Avanzados de Riego (CENAMAR) Subsecretaria de Agricultura y Operación,

Dirección General de Distritos y Unidades de Riego SARH. Gómez Palacio, Durango, México.

Peña, P.E. 1997. Tecnificación del riego presurizado. Manual para diseño de zonas de riego pequeñas. IMTA. pp. 92. Cuernavaca, 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". Barquisimeto, Venezuela. p. 3.2.120–3.2.144.

Piña D., A. Diseño, proyecto y establecimiento de equipos de Riego por Goteo, Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Memorando Técnico No. 347, México, D.F. 1978.

Rodríguez C. A. 1988. Aplicación de fertilizantes en los sistemas de riego por aspersión portátil. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Tema didáctico. pp.10.

Román, L. A. 1994. Informe de la visita realizada a la Universidad del Estado de New Mexico. USA. CENID-RASPA-INIFAP.

Román, L. A.1997. Automatización del riego con cintilla de goteo en el cultivo de maíz. Publicación especial. 25 aniversario del CENID–RASPA. Gómez Palacio Dgo.

Román L. A., S. F. Mendoza M., I. Sánchez C., M. A. Inzunza I., L. Moreno D. 2004. Diseño de sistemas de riego presurizado. Folleto Científico N ° 15 del CENID-RASPA, INIFAP p-5.

Román L. A., S. F. Mendoza M., M. A. Inzunza I., I. Sánchez C., A. Rodríguez C. 2005. Evaluación de sistemas de riego presurizado. Folleto Científico N ° 17 del CENID-RASPA, INIFAP.

Román, L. A., M. A. Inzunza I., S. F. Mendoza M.; E A. Catalán V. y M. Villa C. 2006. Análisis de la variación del flujo en cintilla de goteo por efecto de la temperatura. Memoria de la XVIII semana internacional de agronomía. FAZ–UJED. 19-21 septiembre. pp. 189-194.

Romero F.E. 1980. Producción de Hortalizas en Invernadero con soluciones nutrímentales. Conferencia Tesis Ing. Ind. Quím. Torreón, Coah. Méx. Instituto Tecnológico Regional de la Laguna No. 13 33 p.

Rochester, E. W. 1995. Landscape Irrigation design. The society for engineering in agricultural, food, and biological systems (ASAE). Michigan, USA.

Solomón K. H. 1990. Selecting the appropriate irrigation system. Characteristic of sprinkler and trickle systems examined. Special report Agribusiness Worldwide Septiembre/Octubre: 28-40.

Streeter V. 1971. Mecánica de fluidos, Traducción de la 4a. Edición en inglés por Emilio Romero y Jaime Monera, 1a. Edición México, MC Graw Hill.

Valenzuela R., T. 1975. Memorias del Seminario Nacional de Riego por Goteo. Hermosillo Sonora, México (Tomo 1).

Vermerein L. y G. A. Jobling. 1986. Riego localizado. Documento Num. 36 de Riego y Drenaje. FAO-ONU. Roma. p 132-163.

Z. Sampat A.G. 1976. Física de Suelos, aplicaciones y principios, Editoras Limusa, S.A. México.

FOLLETOS TECNICOS

RM series controllers, mark series controllers, irrigation remote control valves.. Weather-matic, lawn and turf irrigation products 1985, Telsco industries/sprinkler division Box 18205, Dallas, Texas 75218. USA.

Irrigation products toro 1987. USA 5825 Jasmine St.,Riverside. Ca 92504 phone (714) 688-9221).

Irrigation Equipament & Controls Imperial 1986. Imperial Undergroun Sprinkler Company. 13555 w 107 th st. Lenexa, Kansas city 66215 . 913-492-4920 USA.

Irrigation Equipment Catalog. 1987 Buckner, Buckner Royal Coach. Sprinklers, Inc. 4381 North Brawley, Avenue/Fresno Calif. E..U.A. 93722 (209) 275-0500/TWX 910 350 6333.

Manufacturers of Quality Valves and Control Since 1926 S/F 24950 Kearny Avenue, Valencia, California 91355 phone (805) 257-3533 E.U.A.

Manufacturers of Quality Valves and Control Since 1926 S/F 24950 Kearny Avenue, Valencia, California 91355 phone (805) 257-3533 E.U.A.

600 series controllers richdel turf irrigation division Richdel 1851 Roop Street, Carson City, Nevada 89701, 800- Richdel E.U.A.

Lei Controller, Industrial Irrigation Controller, Loudon's Electric Inc. 4465 Pierce RD (805) 327-2077, Backersfield, Ca. 93309 E.U.A.

DIRECTORIO INSTITUCIONAL

SECRETARÍA DE AGRICULTURA, GANADERÍA, DESARROLLO RURAL, PESCA Y ALIMENTACIÓN

Ing. Alberto Cárdenas Jiménez
Secretario
Ing. Francisco López Tostado
Subsecretario de Agricultura
Ing. Antonio Ruiz García
Subsecretario de Desarrollo Rural
Lic. Jeffrey Max Jones Jones
Subsecretario de Fomento a los Agronegocios

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES FORESTALES, AGRÍCOLAS Y PECUARIAS

Dr. Pedro Brajcich Gallegos
Director General
Dr. Enrique Astengo López
Coordinador de Planeación y Desarrollo
Dr. Salvador Fernández Rivera
Coordinador de Investigación, Innovación y Vinculación
Lic. Marcial A. García Morteo
Coordinador de Administración y Sistemas

CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN DISCIPLINARIA EN RELACIÓN AGUA-SUELO-PLANTA-ATMÓSFERA

Dr. José Antonio Cueto Wong
Director

Comité Editorial del **CENID-RASPA**

Presidente: Dr. José Antonio Cueto Wong
Secretario: Dr. Miguel A. Velásquez Valle
Vocales: Dr. Juan Estrada Avalos
M. C. Miguel Rivera González

Edición Técnica:

Dr. José Alfredo Montemayor Trejo
M. C. Leopoldo Moreno Díaz

Edición estilo:
Olivia E. Ortiz Rivas

Esta publicación se terminó de imprimir en el mes de
Noviembre del 2008 en los talleres del Grupo Colorama,
Adolfo Aymes No. 50 Cd. Industrial,
Torreón, Coahuila C. P. 27000.
Tel. (871)7506500
Su tiraje consta de 600 ejemplares

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