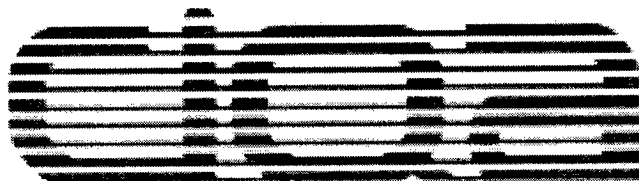


CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA



**MODIFICACION DE LAS DEMANDAS EVAPOTRANSPIRATIVAS DE
CULTIVOS HORTICOLAS CON RIEGO SUBSUPERFICIAL**

PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

OPCIÓN: AGROPLASTICULTURA

PRESENTA:

MIGUEL JIMENEZ CANO

SALTILLO, COAHUILA

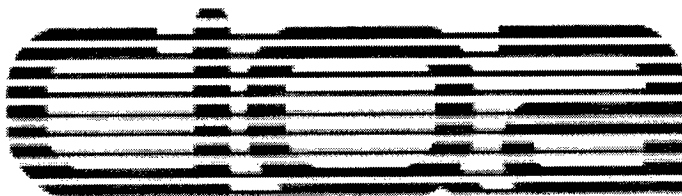

CENTRO DE INFORMACIÓN

13 OCT 2006

AGOSTO 2006

RECIBIDO

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA



**MODIFICACION DE LAS DEMANDAS EVAPOTRANSPIRATIVAS DE
CULTIVOS HORTICOLAS CON RIEGO SUBSUPERFICIAL**

PRESENTADO POR:

MIGUEL JIMENEZ CANO

CASO DE ESTUDIO

PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

OPCIÓN: AGROPLASTICULTURA

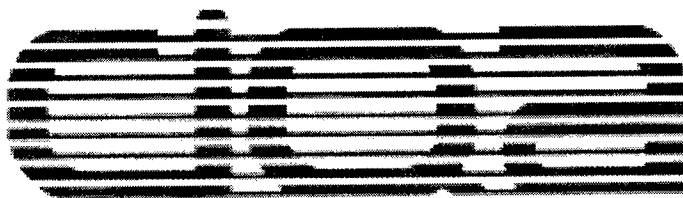
HA SIDO DIRIGIDO POR:

D.R. JUAN P. MUNGUA LOPEZ

SALTILLO, COAHUILA

AGOSTO 2006

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA



**ATRAVEZ DEL JURADO EXAMINADOR HACE CONSTAR QUE EL
CASO DE ESTUDIO TITULADO**

**MODIFICACION DE LAS DEMANDAS EVAPOTRANSPIRATIVAS DE
CULTIVOS HORTICOLAS CON RIEGO SUBSUPERFICIAL**

PRESENTADO POR:

MIGUEL JIMENEZ CANO

**HA SIDO ACEPTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO
DE:**

ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

OPCIÓN: AGROPLASTICULTURA



PRESIDENTE
M.C JUANITA FLORES VELAZQUEZ

VOCAL
M.C. BOANERGES CEDENO RUBALCAVA

SALTILLO, COAHUILA

AGOSTO 2006

INDICE DE CONTENIDO

Págs.

INDICE DE CONTENIDO	i
INDICE DE CUADROS	iii
INDICE DE FIGURAS	iv
INTRODUCCIÓN	1
Objetivo	3
REVISIÓN BIBLIOGRAFICA	4
Conceptos	4
Movimiento del agua.....	4
La Evaluación de Sitio.....	5
Descripción del Sistema	7
Componentes básicos de una instalación.....	7
Filtros.....	7
Ramales portaingertos.....	8
Tuberías principales.....	8
Ventosas y válvulas de retención.....	8
Tuberías de drenaje.....	9
Diseño de los sistemas SDI	11
Selección y colocación del emisor.....	13
Determinación del Número de Emisores por Planta.....	13
Algunos de los aspectos a tomar en cuenta en la selección del gotero.....	14
Orientación de los emisores.....	17
Clasificación de los tipos de emisores.....	18
La hidráulica de las tuberías de conducción.....	21
La ecuación Darcy-Weisbach.....	21
La ecuación Hazen-Williams.....	22
La bomba.....	22
Las válvulas de alivio de presión, alivio de aire y alivio de vacío.....	25
Determinación del Movimiento Lateral del Agua desde el Punto de Emisión.....	27
Hortalizas.....	30
Localización de Emisores e Instalación	31
Hortalizas.....	31
Mantenimiento del sistema	31
Aplastamiento.....	31
Encharcado superficial.....	31
Insectos.....	31
Mordiscos de arduillas y roedores.....	31
Tratamientos a realizar.....	32
El fertirriego.....	34
La cloración.....	35
Riego subterráneo	36
Ventajas.....	36

Desventajas.....	38
Precauciones y problemas.....	38
Evaluación de la Tecnología SDI.....	39
Sistema de monitoreo de SDI.....	39
El sistema de monitoreo y control del riego.	41
Resultados de investigación	43
Profundidad de instalación del gotero.....	46
Espaciamiento de la línea.....	46
Limitaciones que opone el suelo al flujo del agua en el riego localizado subterráneo.....	46
Expectativas de la tecnología del riego localizado subterráneo.....	47
ESTADO DE ARTE.....	48
AREAS DE OPORTUNIDAD.....	49
CONCLUSIONES.....	50
RECOMEDACIONES.....	50
BIBLIOGRAFIA.....	51
NOMENCLATURA.....	54

ÍNDICE DE CUADROS

Pág.

Cuadro 1: Movimiento del agua en suelos de superficie	28
Cuadro 2: Muestra algunas sugerencias para determinar el numero de emisores de acuerdo al cultivo.....	30
Cuadro 3: Presentaciones comerciales de cloro y las cantidades requeridas para tratar 1 acre-pie de agua y lograr una concentración de cloro de 1 ppm.....	36

ÍNDICE DE FIGURAS

	Págs.
Fig.: 1 Las proporciones aproximadas del volumen en un suelo franco limoso requerido para el adecuado crecimiento de plantas.....	4
Fig. 2 Orientación del emisor para sistema SDI.....	18
Fig. 3 Movilidad del agua en el suelo para los sistemas con goteo.....	28
Fig.4 Comparación del volumen humedecido de suelo	29
Fig.5: Instalación de cintilla bajo la superficie del suelo.....	45



INTRODUCCIÓN

En México anualmente se cosechan 19 millones de hectáreas, de las cuales 6.3 millones cuentan con infraestructura de riego, por lo que se ubica en el sexto lugar a nivel mundial en este rubro para el año 2002, aunque de la superficie total solo se cosecharon 4.7 millones de hectáreas. De esta superficie aproximadamente el 60 % se concentra en 80 distritos de riego y la restante distribuida en aproximadamente 30,000 unidades de riego y en pozos particulares. La agricultura bajo riego consume el 70 % de la extracción total de agua y provee alrededor del 40 % de la producción mundial de alimentos. En México, Estados Unidos, Turquía y España, mas del 70 % de sus áreas de riego dependen de agua proveniente de presas y reservorios (Ocaña, 2006). Entre los estados con mayor numero de unidades de riego y de superficie cultivada en miles de km² son: Jalisco, Sinaloa, Michoacán, Guanajuato, Zacatecas y Estado de México

El riego por goteo con cinta enterrada (SDI por sus siglas en ingles: Subsurface drip irrigation) es el método mas reciente, sofisticado y eficiente disponible para el riego de cultivos agrícolas, jardines y pasto. Tiene la capacidad de mejorar los rendimientos y hacer un uso mas eficiente del agua que cualquier otro método de riego actualmente utilizado. Sin embargo, a diferencia de la mayoría de los métodos convencionales, SDI requiere un manejo intensivo y exacto del agua y de los nutrimentos para generar los resultados deseados. Sin la correcta administración el sistema SDI no es para todos, pues requiere que el usuario cambie su pala por una computadora y modifique su forma de pensar y de manejar su empresa agrícola. Entre los principales cambios recomendados, el sistema SDI requiere :

1) El uso de riego de alta frecuencia; 2) la inyección exacta y continua de fertilizantes, y 3) automatización en tiempo real. En su conceptualización real es similar al de muchos de los motores modernos para automóvil que logran mayor fuerza y eficiencia en el consumo de combustibles mediante sofisticadas computadoras integradas que usan técnicas de retroalimentación en tiempo real para ajustar continuamente el encendido y la mezcla de combustible que alimenta de motor. Para que el sistema SDI funcione correctamente, también



Modificación de las Demandas Evapotranspirativas en Cultivos Hortícolas con Sistema de Riego Subsuperficial.

debe tener agua disponible en todo momento, fertirrigación frecuente y exacta, un sistema de control que detecta la humedad del clima y del suelo continuamente y que toma decisiones de riego en tiempo real en respuesta a los cambios de clima y sin la intervención humana. En el caso específico de cultivos hortícolas, el desarrollo de la tecnología de riego, no sólo se ha sustentado en aspectos de rentabilidad, sino también en criterios técnicos de manejos de cultivos en relación al agua de riego. Existiendo una necesidad de hacer más eficiente la aplicación y aprovechamiento del agua por parte del cultivo y a la vez de disminuir las pérdidas por evaporación desde el suelo. Son ampliamente conocidas las ventajas del riego localizado, entre las que se destacan: mejor aprovechamiento del agua, mayor uniformidad de riego, menor infestación de malezas y ahorro de mano de obra, entre otras.

El riego localizado superficial posee la desventaja de que la red de tuberías situada sobre el terreno dificulta las tareas agrícolas, sobre todo las que requieren el uso de maquinaria. Con el riego subterráneo los inconvenientes derivados de la recogida de ramales portagoteros, mano de obra requerida y almacenaje de las tuberías entre campañas de riego quedan eliminados.

A partir de 1989, en Estados Unidos, en el Estado de Kansas, se han desarrollado una serie de estudios e investigaciones en la tecnología del riego localizado subterráneo. Actualmente este tipo de riego sería uno de los sistemas de riego más novedosos existentes en el mercado. Una de las ventajas que presenta es la mejor eficiencia de regadío, localización del uso de fertilizantes, menor incidencia de enfermedades fungosas, menor gasto en herbicidas, mayor vida útil que los sistemas tradicionales y permite el uso de aguas residuales que han sido previamente filtradas.

No obstante, existen una serie de problemas que se plantean a la hora de trabajar bajo tierra, como las obstrucciones por entrada de raíces, succión de partículas y la falta de conocimientos suficientes para solucionar diversos inconvenientes, ya sea hidráulicos o agronómicos, como por ejemplo, la profundidad de instalación de la tubería de riego, la cual es una interrogante que en algunos cultivos es una pregunta aun sin respuesta.



OBJETIVOS

- Realizar una revisión bibliográfica que muestre los avances en los sistemas de riego en la disminución de la evapotranspiración real del cultivo (Etc), en la producción, en la eficiencia en el uso del agua de riego y en los cambios en las líneas regantes.
- Entender los cambios en el diseño hidráulico y agronómico del sistema de riego subsuperficial.



REVISIÓN BIBLIOGRAFICA.

Conceptos

El uso del riego por goteo y por goteo con cinta enterrada ha cambiado completamente el concepto de riego tradicional, en el que se usa el suelo como reservorio de agua y sistema de transporte y se aplica el agua con poca frecuencia hasta llenar todo el perfil del suelo, comparado con el riego por goteo, en que se aplica el agua con bastante frecuencia para satisfacer los requerimientos inmediatos de las plantas y se humedece sólo una pequeña porción del perfil del suelo. El suelo se compone de minerales, materia orgánica, aire y agua. La Fig.:1 muestra la composición volumétrica aproximada de los componentes del suelo tipo franco limoso. El contenido de aire y de agua en el suelo es muy variable y sus proporciones relativas controlan el crecimiento de las plantas. Por esta razón, uno de los principales objetivos del riego debe ser mantener un equilibrio óptimo entre los porcentajes de agua y aire en los poros de la tierra, de tal manera que las raíces puedan absorber el agua y los nutrimentos sin saturarse de agua. (Phene y Ruskin, 1995)

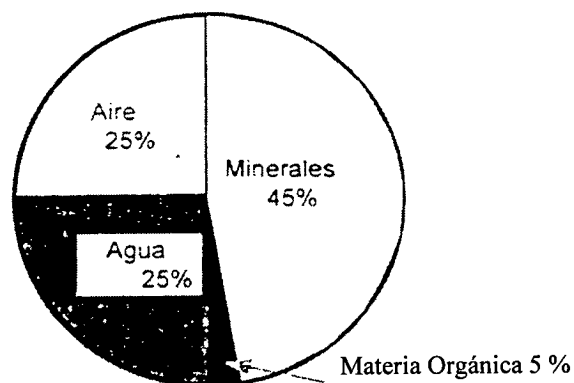


Figura : 1. Las proporciones aproximadas del volumen en un suelo franco limoso requerido para el adecuado crecimiento de plantas.



Movimiento del agua

El agua no sólo es de importancia directa para las plantas sino que juega muchos roles en el suelo, actuando como disolvente, hidratante, amortiguador de temperatura, agente dilatador y debilitador de estructura del suelo, entre otros. Un alto contenido de humedad facilita el movimiento y distribución de agua y solutos en el perfil de suelo (Terrón y Hernández 1992). El agua puede moverse a través del suelo en forma líquida (flujo de masas) y/o en forma de vapor (difusión). Las fuerzas que controlan el movimiento del agua se deben mayormente a la naturaleza capilar del suelo (fuerza capilar) que actúa con igual fuerza en todas las direcciones, y la atracción gravitacional de la Tierra (La fuerza gravitacional) que es constante y jala hacia abajo. La fuerza capilar disminuye conforme se humedece el suelo. Entonces, en tierra seca, las fuerzas capilares son mucho más fuertes que la fuerza gravitacional y tienden a mover el agua en forma pareja en todas direcciones, incluso hacia arriba. Conforme el suelo se humedece más, los poros se impregnan de agua, las fuerzas capilares se debilitan y la fuerza gravitacional domina y jala el agua hacia abajo, en muchas ocasiones incluso debajo del nivel de las raíces, donde no puede ser aprovechada por el cultivo. El manejo básico consiste entonces en regar el suelo con pulsos cortos (el riego de alta frecuencia), semejante a lo que se hace con las plantas en los invernaderos. Cuando se maneja un sistema SDI con el riego de alta frecuencia se controla el movimiento del agua más bien por las fuerza capilares que por la fuerza gravitacional y las plantas reciben agua y nutrimentos directamente desde una reducida porción de la zona de raíces donde es factible mantener casi constantes las concentraciones de humedad y de nutrimentos. (Phene y Ruskin, 1995)

La Evaluación del Sitio

La evaluación del sitio es el primer paso en el proceso de desarrollar un sistema exitoso. Requiere la consideración de los siguientes elementos: el tipo de suelo, la topografía, la calidad del agua, la disponibilidad del agua, los cultivos que se pretenden regar, la rotación de cultivos, la capacidad del sistema de riego y el entorno natural. Cada uno de estos factores es



Modificación de las Demandas Evapotranspirativas en Cultivos Hortícolas con Sistema de Riego Subsuperficial.

clave para el adecuado diseño y manejo de un futuro sistema SDI y poder ahorrar agua de riego. La textura, profundidad y composición química del suelo deben analizarse para determinar si sean las adecuadas y para establecer los criterios fundamentales para el diseño del sistema SDI. Muchas son las propiedades del suelo que afectan a la retención del agua en el mismo, destacando entre todas, la textura, estructura y porosidad (De Santa Olalla y De Juan 1993).

Se requieren evaluaciones topográficas en sitios con declives u ondulaciones porque sería necesario instalar reguladores de presión estratégicamente ubicados, válvulas de alivio de presión y válvulas check. La disponibilidad del agua así como su capacidad, calidad y precio (incluido el costo de la energía eléctrica) también juegan papeles importantes en la toma de decisiones y el diseño. El agua tiene que estar disponible en todo momento y en cantidad suficiente para satisfacer los requerimientos máximos del cultivo. De no ser así, será necesario construir un depósito con capacidad de almacenamiento para satisfacer los requerimientos máximos del cultivo.

Las evaluaciones climáticas y del tiempo son necesarias para determinar el índice máximo de evapotranspiración, los requerimientos de agua, la necesidad de drenaje, el requerimiento de filtración y la protección contra heladas. Cuando sea posible, es preciso revisar datos históricos a largo plazo y usarlos para establecer las guías generales del diseño. Se debe calcular el requerimiento máximo de agua de riego para determinar la capacidad del sistema de riego (la cantidad de agua que debe entregarse en el campo para satisfacer la máxima cantidad de agua que el cultivo pudiera necesitar).

Los criterios de calidad del agua se dividen normalmente en *físicos*, *químicos* y *biológicos*. Usualmente, se usan los criterios físicos (sólidos solubles) para determinar los requerimientos de filtración; los criterios químicos (ph, sólidos disueltos, sodio, calcio, magnesio y hierro total) para prescribir el tratamiento del agua y prevenir los precipitados químicos; y los criterios biológicos (algas y poblaciones bacterianas) para determinar la cloración y/o acidificación necesaria para controlar el crecimiento biológico y la contaminación. (Bucks y Nakayama, 1980)



Descripción del sistema

Componentes básicos de una instalación

Filtros.

El filtro es el primer componente entre la bomba y el sistema de riego, es de suma importancia ya que de él depende la eliminación de impurezas que provocarían la obturación de los emisores. Se recomienda usar un equipo de filtrado con elementos filtrantes de anillos que tenga un grado de filtración adecuado para cada tipo de agua de riego, de forma que se garantice una limpieza eficaz evitando la obstrucción de los emisores.

La microirrigación requiere una buena filtración y esto es aún más crítico en los sistemas SDI porque se instalan debajo de la superficie y son mucho más difíciles de monitorear y reparar. Son varios los factores que deben tomarse en cuenta al seleccionar un sistema de filtración, incluidas la confiabilidad, la exactitud, los requerimientos de mano de obra y de mantenimiento, el costo, el volumen de agua de retrolavado que genera, el requerimiento de fuerza (pérdida en la cabeza), los requerimientos de espacio, la calidad del suministro de agua, etc.

Al menos cuatro factores deben considerarse al especificar el tipo y la capacidad del filtro:

1. Gasto hidráulico
2. La calidad del agua de entrada
3. La calidad del agua en la descarga
4. El tipo de emisor

Entre más pequeño es el recorrido del agua en la salida del emisor, más importante es la filtración requerida.

Hay muchos tipos de filtros, desde un cedazo sencillo de malla hasta un tipo combinado con depósito para sedimentación separador de arena y medio de filtración y malla. Los fabricantes



Modificación de las Demandas Evapotranspirativas en Cultivos Hortícolas con Sistema de Riego Subsuperficial.

proveen cuadros de diseño de la relación pérdida-flujo, la calidad del agua, el tamaño de la salida del emisor y partículas de materia.

Ramales portainjertos.

Es recomendable enterrarlos a una profundidad comprendida entre 20–50 cm, dependiendo del tipo de cultivo y de la textura del suelo. Este factor es muy importante, ya que de él depende la infiltración del agua; por ejemplo, un terreno arenoso no permite capacidad de retención de agua, por lo que en este tipo de suelos, no sería conveniente profundizar mucho con las tuberías emisoras (el agua quedaría por debajo de la zona radicular, ocasionando la pérdida del recurso y la lixiviación de los nutrientes).

En cultivos de hortalizas con sistema radicular superficial enterraremos ligeramente los laterales, mientras que en cultivos leñosos podemos llegar a los 50 cm. En cuanto al tipo de gotero recomendamos la utilización del gotero integrado autocompensante-antidrenante, aunque también se pueden instalar goteros integrados no compensantes teniendo especial cuidado con las depresiones en la instalación.

Tuberías principales.

Son las encargadas de transportar el agua desde la bomba hasta las tuberías emisoras. Pueden ser primarias, secundarias o terciarias, dependiendo del tamaño de la instalación. El diámetro y la presión nominal de las tuberías principales deben estar calculados para cada instalación en concreto. Estos cálculos se realizan según variables como el caudal, pérdida de carga, presión, etc.

Ventosas y válvulas de retención.

Son accesorios imprescindibles en cualquier sistema de riego subterráneo, ya que evitan que penetre suciedad en los goteros por efecto de succión o inversión de presión cuando paramos la bomba. Este efecto se produce cuando el agua que queda en las tuberías retorna por gravedad produciendo un vacío, y como consecuencia, una succión dentro de los goteros. Las



Modificación de las Demandas Evapotranspirativas en Cultivos Hortícolas con Sistema de Riego Subsuperficial.

ventosas se colocarán siempre en los lugares más altos de la instalación, además, deben ser de doble efecto ya que, por un lado solucionan el problema de succión, impidiendo que entre el aire dentro de las tuberías cuando disminuye la presión del sistema; y por otra parte, permiten sacar el aire de las tuberías a la hora de cargar el sistema. Las válvulas de retención tienen una función primordial en instalaciones subterráneas, evitan que el agua circule en sentido contrario dentro de las tuberías, impidiendo que se vacíen, y eliminando de esta forma depresiones en el sistema.

Tuberías de drenaje.

Son otra de las partes indispensables en cualquier instalación de riego subterráneo. Tienen la misión de evacuar al exterior toda la suciedad de la instalación cuando realizamos las limpiezas periódicas de emisores. También es conveniente colocar ventosas en estas tuberías facilitando aún más la expulsión de aire. El diseño y manejo básicos de los sistemas SDI difieren ligeramente respecto de los sistemas de goteo estándares, por cuatro factores importantes:

1. Se deben instalar equipos para prevenir el reflujó con válvulas check, válvulas de seguridad y válvulas de alivio de presión en varios lugares; estos últimos se instalan principalmente en los puntos de más alta elevación en el sistema
- 2 Los sistemas SDI requieren que se purguen frecuentemente las tuberías principales, secundarias y laterales, especialmente durante los primeros 6 meses de operación (la instalación de una línea secundaria de lavado puede facilitar el lavado de los laterales).
3. Los sistemas de raíces de los cultivos regados por SDI normalmente están a mayor profundidad que las de plantas regadas por sistemas de goteo de superficie, el manejo de la fertilidad es más crítico, pues la zona de las raíces se extiende hasta niveles del suelo que carecen de muchos nutrimentos inmóviles (en particular el fósforo).
4. La quimigación se requiere para prevenir que las raíces se introduzcan en los emisores.



Modificación de las Demandas Evapotranspirativas en Cultivos Hortícolas con Sistema de Riego Subsuperficial.

Aunque los sistemas SDI comerciales pueden variar significativamente en cuanto a su distribución física, normalmente constan de componentes similares: una bomba, filtros, una bomba de inyección de agroquímicos y tanques de fertilizante, un medidor de flujo, una válvula para sostener la presión, válvulas selenoides, válvulas de alivio de presión y de seguridad, la línea principal, y las líneas secundarias, laterales y los emisores. Cada sistema y sus componentes son específicos para el sitio y el cultivo y deben diseñarse de acuerdo con las condiciones particulares en que serán usados. Varios programas de diseño para computadoras personales están disponibles para diseñar los sistemas de microirrigación que se basan en ecuaciones de diseño estándar (Gilbert y Ford, 1986).

El sistema de riego por goteo con cinta enterrada consta de varios elementos que sólo pueden definirse concretamente después de inspeccionar el sitio:

- a. El emisor y los laterales de riego por goteo con cinta enterrada
- b. Las líneas principal, secundarias y de lavado.
- c. La unidad de bombeo
- d. El sistema de filtración
- e. El control de la presión, el sistema de regulación y el sistema de alivio.

El SDI es aquel en el que los laterales porta-emisores están enterrados en el suelo a una determinada profundidad, entre 0.05 y 0.50 m dependiendo de las características del cultivo (profundidad del sistema radicular) y de las características del suelo (capilaridad). En suelos arenosos trabajaremos a profundidades menores que en suelos arcillosos. En cultivos de hortalizas con sistema radicular superficial enterraremos ligeramente los laterales, mientras que en cultivos leñosos podemos sobrepasar los 0.50 m. Por otra parte, la instalación puede permanecer durante años o recogerse e instalarse en cada cultivo.

Actualmente el riego localizado subterráneo está ampliamente establecido en multitud de cultivos y superficies ajardinadas de todo el mundo. En EE.UU. hay más de 20,000 ha y en España más de 4,000 ha y podemos asegurar que se encuentra en fase de expansión por las múltiples ventajas que ofrece y serán expuestas a lo largo de este escrito. La aplicación de



Modificación de las Demandas Evapotranspirativas en Cultivos Hortícolas con Sistema de Riego Subsuperficial.

riego por goteo subterráneo ahorra entre 25 y 40% del total de riego requerido y más del 10% de la cantidad de fertilizante necesario. (Phene, 2000)

Los resultados obtenidos en más de 30 cultivos demuestran que la producción cuando empleamos riego por goteo subterráneo es igual o superior en todos los casos a cualquier otro sistema de riego y además requiere menos agua en la mayoría de los casos. La posibilidad de emplear agua residual depurada, especialmente en céspedes y zonas ajardinadas ofrece un gran potencial de expansión con desarrollo de líneas comerciales específicas.

El riego subterráneo permite la aplicación de agua y fertilizantes directamente a las raíces de las plantas. Con el riego subterráneo es más eficiente el uso del agua porque la superficie del suelo se mantiene seca y se pierde menos agua por evaporación. Además, al mantener la superficie del suelo seca, se desarrollan menos malas hierbas y se reduce el uso de herbicidas

El arranque de un nuevo sistema SDI requiere una fuerte inversión de capital y tiempo, la voluntad de olvidar las viejas prácticas de riego, una intensa curva de aprendizaje y, a menudo, la orientación de consultores experimentados. Para tener éxito, el cambio a un sistema SDI requiere la consideración secuencial de varios pasos de igual importancia, como los siguientes: la evaluación del sitio, el diseño y revisión del sistema, la instalación, las pruebas, el manejo o administración, la generación de una base de datos y la evaluación anual de resultados.

El Diseño de los Sistemas SDI

Anteriormente, hablamos del requerimiento máximo de agua de riego, de la capacidad del sistema y de los criterios de la calidad del agua. Aquí, nos enfocamos en un esbozo breve que describe algunos métodos de diseño: 1) la elección del emisor; 2) la hidráulica de tuberías; 3) la bomba; 4) filtración; 5) las válvulas de alivio de aire y de presión; 6) la quimigación y la cloración, y 7) el sistema de monitoreo y control. Se necesitan válvulas que reducen y controlan la presión para mantener las presiones del sistema durante su operación y el retrolavado del filtro. El sistema de control y regulación de presión y el lavado de las líneas principales, secundarias y laterales deben diseñarse de tal manera que suministren la presión y



Modificación de las Demandas Evapotranspirativas en Cultivos Hortícolas con Sistema de Riego Subsuperficial.

el flujo de agua necesarios para mantener la adecuada distribución del agua a lo largo del sistema y poder satisfacer la demanda de la evapotranspiración diaria de los cultivos que se riegan, sin que tenga que trabajar continuamente. Entre más gruesa sea la textura del suelo, más frecuentes y cortos serán los ciclos de riego. Así, el índice de descarga de los emisores debe ajustarse de acuerdo con las propiedades de transmisión del agua en el suelo y velocidad de infiltración. Por ejemplo, en un suelo franco arenoso con una densidad de 1.5 g/cm^3 y un sistema SDI instalado a una profundidad de 45-60 cm, el riego nunca debe durar más de 45-50 minutos, para evitar que el agua salga a la superficie. Sin embargo, en un suelo franco arcilloso se puede aumentar el tiempo a 90 minutos, pero sólo en raras ocasiones a más de 120 minutos. (Phene y Ruskin, 1995)

La capacidad del sistema debe establecerse de tal manera que satisfaga la máxima demanda de evapotranspiración del cultivo en menos de 24 h. y preferentemente en sólo 16 a 18 h. los laterales de riego por goteo deben adaptarse para el riego de alta frecuencia y tendrán que ser lo suficientemente cortos como para poder alcanzar su presión de operación rápidamente (en menos de 2-3 minutos). En los casos de cultivos perennes (huertas, viñedos, pastos, jardines, etc.) los laterales deben ser de pared reforzada con grosor de 1.2 mm y los rollos de tubería deben ordenarse de tal manera que no tengan conexiones a la mitad de un surco. Los laterales deben conectarse a la unidad secundaria en el lado de arriba y a las unidades secundarias de lavado en el lado de abajo. las válvulas de alivio de presión, de vacío y de lavado deben instalarse en cada múltiple o manifold de lavado. Los múltiples de lavado deben diseñarse para tener una velocidad de lavado de 2 a 3 m/seg. Además, es preciso instalar válvulas de alivio de presión y para romper el vacío en todos los puntos más elevados de los laterales de goteo. Se deben usar válvulas rompedoras de presión y vacío en las partes más altas de las líneas regantes y válvulas check en las partes con pendiente para prevenir el reflujó y la generación de vacío. (Driscoll, y Bralts 1985.)



Selección del emisor y Colocación

Un factor importante en el diseño de un sistema de riego localizado, es la selección y colocación del emisor. Los sistemas de riego localizado son instalados en varias formas; enterrado, superficial, tendido sobre la superficie del terreno, tendido bajo los acolchados plásticos y suspendido en las plantas o tutores de apoyo. El modo de instalación y selección dependerá del manejo agrícola, desarrollo del cultivo y del tipo de emisor usado (Van Der, 1999)

Son muchos los factores que influyen en la elección de un emisor y en el diseño de las líneas laterales, entre ellos: factores de índole agronómico, el tipo del suelo, la textura del suelo y su profundidad, la hidráulica, la preferencia del agricultor, el potencial de la invasión de raíces, la topografía, etc... Aquí nos ocupamos principalmente de (a) la uniformidad del emisor (E U) y sus efectos en la aplicación de agua a las plantas y (b) las características hidráulicas del emisor que determinan el flujo como una función de la presión. (Phene, 2000)

La irrigación por goteo subsuperficial, es todavía relativamente nueva, pero puede ofrecer beneficios a los productores, superando a los métodos de riego por goteo superficial convencionales. Los objetivos de los sistemas SDI, son mejorar el rendimiento del cultivo y la calidad; mantener una superficie seca de suelo para reducir el desarrollo de malezas, pérdidas de humedad y enfermedades; y alcanzar una amplia distribución lateral a través de todo el perfil de suelo que maximice el volumen de raíces humedecidas y minimice las pérdidas por percolación. El diseño, mantenimiento e instalación de los sistemas SDI son diferentes que para los sistemas superficiales. (Van Der, 1999)

Determinación del Número de Emisores por Planta

La determinación de cuantos emisores deben usarse por planta dependerá de:

Patrón de humedecimiento del suelo inducido por el emisor. El patrón de humedecimiento que se desarrolla depende de la tasa de descarga del emisor, espaciamiento del emisor y tipo de suelo. El diámetro del volumen de suelo humedecido generalmente se incrementará con un



incremento en el contenido de arcilla en el suelo o por un incremento en la descarga del emisor descargada por emisores individuales. La fig. 3 muestra la situación ideal donde el volumen de suelo humedecido de un emisor alcanzará el otro para formar una franja humedecida continua a lo largo de la hilera del cultivo. Observa como una capa limítrofe de suelo puede afectar el volumen de suelo humedecido. En suelos arcillosos, el volumen de suelo humedecido depende principalmente de las fuerzas de capilaridad del suelo, mientras que la fuerza tiene un mejor efecto en suelos arenosos. El volumen de suelo humedecido en suelos arenosos es poco, por lo mismo se requieren espaciamientos de emisores más cercanos.

Un sistema de riego localizado debería humedecer un volumen de suelo al menos de un 50% del volumen radical de la planta, que pudiera desarrollarse bajo un sistema de irrigación convencional de aspersión. (Van Der, 1999)

Algunos de los aspectos a tomar en cuenta en la selección del gotero:

- Pulsar el ciclo de irrigación con tiempos de encendido de una hora o menos. Para pulsar el sistema adecuadamente y que el movimiento periódico del agua se normalice. Las distribuidoras subprincipales deberían permanecer llenas de agua entre ciclos para mantener la uniformidad del sistema. Revisar las válvulas previamente para llevar a cabo ésta operación.
- Emisores de bajas tasas de flujo (2 l/hr.) deberían preferirse y el número de emisores en la lateral incrementarse si el suelo tiene una baja capacidad de infiltración.
- Minimizar el disturbado del suelo durante la instalación.
- Asegurar que la línea sea instalada dentro de la hilera del cultivo donde el equipo no compactará el suelo sobre la línea de goteo.
- Labrar ligeramente el suelo compactado sobre la línea de goteo enterrada si la compactación ocurre.

1. Tipo de cultivo. Un emisor debe ser seleccionado para ajustarse al tipo de cultivo. La descarga del emisor y colocación están relacionados con el espaciamiento de plantación y requerimientos de agua. Los emisores deben ser capaces de suministrar los requerimientos de agua pico, así como humedecer una porción adecuada de la zona radical del cultivo. Los



Modificación de las Demandas Evapotranspirativas en Cultivos Hortícolas con Sistema de Riego Subsuperficial.

cultivos anuales, tales como las hortalizas, se adaptan mejor a los sistemas económicos de cinta (desechable), mientras que los cultivos perennes pueden requerir sistemas más permanentes.

2. Calidad de agua. El tamaño del orificio del emisor, gobierna los requerimientos de filtración necesaria. En áreas de muy pobre calidad de agua, puede ser conveniente seleccionar un emisor que no se obstruya fácilmente, y para así reducir las necesidades de filtración.

3. Manejo del cultivo. Los métodos de cosecha o corte del cultivo, el control de la cubierta vegetal y otras prácticas culturales determinan qué tipo de emisor podría resultar más aceptable. El sistema de emisores debe durar lo suficiente y soportar cualquier abuso físico ocasionado por las operaciones de labranza (por ejemplo, corte o pisoteo durante la cosecha mecánica).

4. Instalación del Sistema. Los sistemas de riego localizado, pueden colgarse de las plantas, tenderse sobre el terreno o colocarse enterrados. Los sistemas enterrados no son revisados fácilmente, dificultando ver si el sistema está funcionando apropiadamente. Los medidores de flujo deben ser considerados obligatorios a este tipo de instalaciones, para asegurar que la operación del sistema se mantiene en un nivel eficiente y uniforme. Los sistemas de emisores en línea son mucho más fáciles para instalar en cultivos de hilera o en sistemas enterrados. Los emisores tipo enchufe, se adaptan mejor a instalaciones muy específicas de las plantas, donde los puntos de emisión deben estar exactamente localizados con respecto al área radical del cultivo.

5. Características de Operación. Se recomienda diseñar el sistema de tal modo que cada unidad no opere por más de 12 horas por día. Un sistema de riego localizado debe operar de manera intermitente para reducir el desarrollo de algas en las líneas laterales y permitir el movimiento de aire dentro del suelo. Los requerimientos de agua pico para cada unidad, deben por lo tanto, ser suministrados en 12 horas o menos.

6. Costo. Un sistema de riego localizado, usa entre 500 a 1000 emisores por ha.. El costo del emisor es por lo mismo una porción significativa del costo total del sistema.

7. Topografía. Las diferencias en elevación a través del campo pueden requerir emisores de flujo turbulento o compensador de presión para mantener una buena uniformidad en el sistema de riego localizado.



8. Coeficiente de Variación. Las variaciones en la tasa de flujo ocurrirán debido a las imperfecciones de fabricación al construir el emisor. La varianza por manufactura debería ser determinada y analizada para asegurar que las variaciones resultantes de flujo no afectarán severamente las uniformidades del sistema.

La uniformidad de emisión de los emisores es afectada por las variaciones de presión (cuando se trata de emisores que no cuentan con compensadores de presión) que resultan de cambios de elevación y pérdidas por fricción, así como por la variación que se debe a los procesos de fabricación, cambios de temperatura y desgaste. Kéller y Karmeli 1975, han definido el coeficiente de uniformidad de la manera siguiente:

$$EU = \left[1 - 1.27 \frac{Cv}{\sqrt{e}} \right] \times \left[\frac{q_m}{q_a} \right]$$

Donde:

EU = Coeficiente de uniformidad del diseño (%)

e = Numero de emisores por planta.

Cv = Coeficiente de variación del fabricante (un decimal)

q_m = Gasto hidráulico mínimo del emisor cuando opera el sistema a su presión mínima (Uh)

q_a = Gasto hidráulico promedio del emisor cuando opera el sistema a su presión promedio (Uh)

Un valor EU adecuado para los sistemas SDI es mayor a **0.90**. Se puede aumentar el EU al disminuir Cv, al incrementar el número de emisores por planta; (e,) o al usar una proporción q_m/q_a que se acerca lo más posible a 1.

9. Características del Emisor. El tamaño de emisor, construcción y color pueden determinar la resistencia a insectos, roedores y otras plagas. Los roedores y los insectos pueden ser atraídos hacia ciertos colores. Asegurarse que el emisor tenga una garantía que sea suficiente para las condiciones del sitio. Las tasas de flujo o descarga pueden variar enormemente, para los productos que tienen una extensión de vida muy corta.



10. Gasto hidráulicos de los emisores

Los gastos de los emisores se definen al determinar empíricamente los índices de flujo como una función de la presión de operación. Esto se conoce como la función de flujo del emisor:

$$Q = K_e H^x$$

Donde

Q = Gasto hidráulico del emisor (L/h)

K_e = Factor de proporcionalidad que clasifica las dimensiones del emisor

H = Presión de operación (m)

x = Exponente del gasto hidráulico del emisor que caracteriza el régimen de flujo

En general, los valores K_e y x son proporcionados por el fabricante o pueden calcularse al graficar q contra H en una escala log-log. El declive de la línea recta es x y el punto de interceptación en H = 1 da K_e . Entre más bajo está x, menos sensibilidad habrá a la variación de presión. Por ejemplo, un emisor totalmente compensado por presión tendría x = 0, un emisor de flujo turbulento, x = 0.5 y uno de flujo laminar, x = 1.

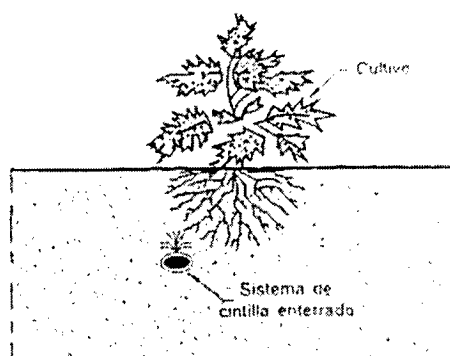
Orientación de los Emisores

Los contaminantes del agua de irrigación que se incrementan serán depositados en el fondo de la lateral. Por lo mismo, al igual que en los sistemas superficiales, los sistemas SDI deberían siempre tener los emisores instalados con los orificios señalando hacia arriba, permitiendo que los sedimentos y partículas orgánicas sedimenten y se alejen de los orificios.

El volumen de suelo efectivo humedecido por un sistema de goteo subsuperficial es mayor que aquel de un sistema superficial. (Van Der, 1999)



Figura 2: Orientación del emisor para sistema SDI



Clasificación de los Tipos de Emisores

Aunque, el método de reducción de presión puede variar, los emisores pueden ser clasificados en tres categorías separadas: manguera PE con goteo integrado o cinta de goteo, goteo individual y microaspersión.

a) Sistema de Cinta de Goteo

Los sistemas de cinta de goteo tienen un emisor u orificio de descarga que es insertado dentro de la manguera de goteo durante el proceso de manufactura. La cinta de goteo se refiere a productos que tienen espesores delgados de pared, y tienen puntos de emisión hechos dentro de la cinta a una separación preestablecida en la fábrica. El tubín de polietileno, puede también compararse con emisores insertados dentro de la manguera, pero estos sistemas son un producto más rígido y usualmente se consideran como sistemas de manguera con goteo integrado. Estos tipos de sistemas son cubiertos en la siguiente sección.

La cinta de goteo se refiere a productos que utilizan tubo de manguera suave, con espesores de pared que varían de 4 milésimas a 25 milésimas de pulgada.



Los productos de pared muy delgada se utilizan en ciclos de cultivo donde la cinta es desechada después de cada ciclo de producción. La cinta de pared densa (o más gruesa) se utiliza en situaciones donde la cinta debe durar 5 años o más tiempo. La presión de operación recomendada dependerá del espesor de pared de la cinta. Para un espesor de pared de 15 mm o mayor, una presión de operación de 15 psi es sugerida. Para aquellas cintas con menos de 15 mm, la presión de operación sugerida es de 12 psi. Las cintas de goteo tienen puntos de emisión espaciados a intervalos regulares a lo largo de la lateral para suministrar agua a las plantas. La tasa de flujo para el sistema de cinta por goteo, se mide a menudo por la longitud de lateral, mas bien que para cada orificio individual. Las cintas de goteo están disponibles en ambos tipos: de alto flujo y de bajo flujo. Las tasas de flujo pueden variar desde 113.55 l/h. hasta 227 l/h. por cada 61 m de longitud. El espaciamiento de los puntos de emisión de descarga, la presión de operación y el diámetro de la cinta determinarán la tasa de flujo del producto. El espaciado de los puntos de emisión de emisión puede variar desde 10 a 60 cm. Los sistemas de cinta de goteo no son usualmente compensadores absolutos de presión. (Van Der, 1999)

Los sistemas de cinta de goteo, son normalmente utilizados para cultivos en hilera, tales como tomates, fresas y hortalizas. El movimiento lateral del agua dentro del suelo inducido con estos sistemas, es similar a los sistemas con emisores de goteo individual. La expansión del movimiento lateral logrado variará con el tiempo de operación. Los cultivos de hilera irrigados con un sistema de cinta de goteo que tienen espaciamiento cercano entre puntos de emisión usualmente desarrollarán una franja humedecida a lo largo de la hilera completa.

Los sistemas tipo pared porosa, son a menudo comercializados como sistemas de cinta de goteo. Estos sistemas no son considerados un producto agrícola. Estos productos a menudo se hacen de llantas recicladas, contienen microporos a través de la manguera completa. El agua lentamente suda a través de estos microporos. Estos sistemas pueden fácilmente taparse y son difíciles para limpiar. Los sistemas de pared porosa no son recomendados para instalaciones agrícolas, ya que la uniformidad de aplicación es muy pobre.



La máxima longitud para cada lateral de cinta de goteo dependerá de:

- Diámetro de la cinta
- Espaciamiento del emisor
- Tasa de flujo seleccionada
- Uniformidad de emisión deseada
- Coeficiente de variación de manufactura (C_v)
- Exponente de descarga (x)

Para seleccionar apropiadamente una cinta de goteo, se deben considerar ciertos parámetros, algunas correlaciones entre el coeficiente de variación del fabricante (C_v) y el exponente de descarga (x).

Los sistemas con laterales cortas (menos de 91.5 m.) en campos con pendientes descendentes ligeras o a nivel, tendrán pequeños cambios de presión a través de la unidad. El exponente de descarga del emisor no será un gran factor en mantenerse la uniformidad del sistema. Para estos sistemas, selecciona una cinta de goteo que tenga un bajo coeficiente de variación de manufactura.

Los sistemas con laterales largas (mayores de 91.5 m.), seleccionados para terreno ondulado o empinado, están sujetos a mayores variaciones de presión. Para estas situaciones, el exponente de descarga del emisor debe ser el factor principal en la selección de una cinta. ya que un exponente pequeño reducirá la variabilidad en las descargas del emisor debido a cambios en la presión. El factor C_v debería ser una consideración secundaria. (Van Der, 1999)

b) Sistema de Emisores con Goteo Individual

Los sistemas de goteo individual, usualmente contienen emisores que descargan una baja tasa de flujo a través de un gotero. Los sistemas de goteo individual pueden ser diferenciados de los sistemas de cinta de goteo, porque ellos utilizan mangueras dura de polietileno para la línea lateral. A diferencia de los sistemas de cinta de goteo que tiene puntos de emisión construidos



Modificación de las Demandas Evapotranspirativas en Cultivos Hortícolas con Sistema de Riego Subsuperficial.

en la lateral, los sistemas de goteo convencional, utilizan un emisor para regular la descarga. El emisor es un componente separado de la manguera lateral. Las líneas laterales, pueden ser compradas con el emisor ya instalado en la tubería durante el proceso de manufactura. La tecnología más vieja requería cortar la manguera para luego instalar el emisor. La mayoría de los proveedores surten ahora laterales con los emisores insertados dentro del la manguera durante el proceso de extrusión. Estos tipos de sistemas son a menudo clasificados como sistemas de goteo integrado. Los emisores de goteo individual, operan en un rango de flujo de 1 l a 4 l por hora y a presiones de operación que varían desde 0.703 a 1.40 kg/cm². Los emisores compensadores de presión son usualmente emisores de goteo individual y pueden funcionar en rangos de presión de 0.70 a 3.5 kg/cm². Un rango de presión de 1.0 a 2.8 kg/cm², es normalmente recomendada. (Van Der, 1999)

La hidráulica de las tuberías de conducción.

El entendimiento de la hidráulica de tuberías es necesario porque permite al diseñador especificar una red con líneas principales y secundarias que proporcionará agua a cada lateral y emisor dentro del rango de presión permitido. Son dos las ecuaciones básicas usadas para determinar la pérdida por fricción en líneas principales sin salida y en líneas secundarias y laterales con salidas múltiples, las ecuaciones de Darcy-Weisbach y Hazen-Williams:

La ecuación **Darcy-Weisbach** (para tuberías de diámetro < a 75 mm)

La ecuación Darcy-Weisbach tiene la siguiente forma:

$$H_f = 6.377 fL Q^2/D^5$$

Donde:

H_f = Pérdida por fricción (m)

D = Diámetro de la tubería (mm)

Q = Gasto hidráulico (l/hr)

f = Factor de fricción

L = Longitud de la tubería (m)



Modificación de las Demandas Evapotranspirativas en Cultivos Hortícolas con Sistema de Riego Subsuperficial.

La ecuación incluye un factor de aceleración por gravedad de 9.81 m/s^2 , para tuberías lisas ya que el factor f cambia según el valor Reynold ($Re = Vd/u$ donde V es la velocidad, d es el diámetro de la tubería y u es la viscosidad cinemática), el factor de fricción es simplificado en términos del rango de Re , de acuerdo con lo siguiente:

1.- Flujo laminar ($Re < 2,000$) $f = 64/ Re$

2.- La región de la transición del gasto ($2,000 \leq Re \leq 4,000$) $f = 3.42 \times 10^5 Re^{0.85}$

3.- El flujo turbulento ($4,000 \leq Re \leq 100,000$)

$$f = \frac{0.316}{Re^{0.25}}$$

La ecuación empírica *Hazen-Williams* (tuberías con diámetro de 75 mm o mayor). Para tuberías de plástico ($C = 150$), la ecuación empírica *Hazen-Williams* puede expresarse así:

$$H_f = 0.628 \frac{L}{D^{4.865}} \left[100 \frac{Q}{C} \right]^F 1.852$$

Donde:

H_f = Pérdida por fricción (m)

L = Longitud de la tubería (m)

D = diámetro de la tubería (mm)

Q = Gasto hidráulico (l/h)

C = Coeficiente de rugosidad de la tubería

La ecuación Hazen-Williams es sencilla para usar y puede aplicarse a diseños de tubería PVC con valores Reynold mayores a unos 40,000.

La bomba

Los sistemas de riego por goteo con cinta enterrada, al igual que la mayoría de los sistemas de microirrigación, normalmente requieren una unidad de bombeo que envía agua presurizada al sistema según la demanda de la presión requerida. Las bombas centrífugas son usadas a



menudo para este propósito. Estas bombas funcionan en muchas condiciones de operación, pero su alcance de succión es limitado (en teoría unos 10 m al nivel del mar, pero en la práctica más bien sólo 7 m) y es necesario purgarlas.

Las curvas características en las gráficas definen la operación de esas bombas en términos de descarga hidráulica, altura, el tamaño del impulsor y potencia. Los fabricantes tienen gráficas disponibles y normalmente proporcionan las curvas de altura-capacidad, de eficiencia, de potencia y de la succión neta positiva requerida en la cabeza . (Phene, 2000)

a. Las curvas de la capacidad de la cabeza

Las curvas de altura-capacidad de la cabeza relacionan la cabeza dinámica total (TDH) con el índice de descarga y pueden ser usados por el diseñador para escoger una bomba de acuerdo con las condiciones específicas de uso del sistema SDI. Se define el TDH como a continuación:

$$TDH = H_s + H_d + H_f + H_v$$

Donde

TDH= Cabeza dinámica total

H_s = Distancia vertical de succión, desde la superficie de la fuente de agua hasta la línea central del impulsor de la bomba.

H_d = Altura de descarga, la presión a la salida de la bomba

H_f = Pérdida por fricción en la descarga, la suma de las pérdidas por fricción en las tuberías, más otras pérdidas menores desde la entrada del agua hasta la salida de la bomba

H_v = Velocidad de la cabeza, la energía cinética del agua en flujo que en la práctica es insignificante



b. Las curvas de eficiencia

Las curvas de eficiencia muestran la cantidad de trabajo realizada por la bomba como porcentaje de la fuerza entregada a su eje.

c. Las curvas de potencia

Las curvas de potencia muestran la cantidad de potencia requerida para impulsar la bomba (en unidades inglesas). La fuerza de frenado se define como:

$$BHP = \frac{QXH}{3960 E_p}$$

Donde:

BHP = Fuerza de frenado

Q = Gasto hidráulico de la bomba (gpm)

H = TDH (en pies)

E_p = Eficiencia de la bomba (%)

$$P = \frac{0.000189 \times (Q \times H)}{E_p \times E_m}$$

Donde:

E_m = Eficiencia del motor

El costo de la operación de una bomba puede calcularse por las siguiente ecuación:

$$C = P \times C_e \times T$$

Donde:

C = Costo de operación (\$)

P = Consumo de energía (kW)

C_e = Costo de la energía eléctrica (\$/kWhr)

T = Tiempo de operación (h)



d.- Las curvas de la succión positiva neta requerida en la cabeza

Las curvas de la succión positiva neta requerida en la cabeza dan la presión de entrada requerida a la entrada de la bomba para evitar que cavite.

La válvulas de alivio de presión, alivio de aire y alivio de vacío

La Fertirrigación debería ser incorporada en cualquier sistema de goteo enterrado para asegurar la aplicación de suficientes nutrientes al cultivo. El sistema de inyección utilizado para aplicar ácidos o cloro para tratamiento del sistema puede ser utilizado para fertirrigación también.

Succión de Partículas de Suelo

Un efecto de vacío se desarrolla al apagar el sistema, este retroflujo puede ocasionar un chupado de la manguera haciendo que las partículas de suelo sean "ingeridas" hacia la cinta. Este problema puede resolverse asegurando que válvulas adecuadas de liberación sean instaladas en todos los puntos altos de las líneas distribuidoras y subprincipales de cada unidad. Dos es el número normal de válvulas liberadoras de vacío que deben usarse para este propósito. Un emisor puede también ser dejado por encima del terreno al inicio y final de cada lateral para que actúen como una mini válvula de liberación de vacío. (Phene, 2000)

a.- Las válvulas de alivio de presión

Las válvulas de alivio de presión deben instalarse en cada punto del sistema donde existe la posibilidad de presiones altas en cualquiera de estas condiciones:

1. Al arrancar la bomba.
2. Al abrir o cerrar válvulas repentinamente.
3. Cuando falla una válvula reguladora de presión u otra válvula check o de alivio.
4. El cierre repentino de válvulas de alivio de aire cuando se presenta un golpe de ariete.
5. La falla de parte del diseñador al evaluar correctamente las condiciones de presión estática y/o dinámica en la tubería.



6. El cierre repentino de una válvula check.

La mayoría de esos problemas potenciales puede prevenirse al consultar un ingeniero de diseño capacitado y/o mediante la instalación de un sistema de monitoreo control en tiempo real capaz de reconocer al instante condiciones de presión de flujo excesivas o deficientes apagar el sistema e inicializar alarmas. Aun en los casos en que se cuenta con un diseño adecuado, se presentan casos en que es recomendable la instalación de válvulas de alivio de presión. (Phene, 2000)

1. En sitios donde la falla de otros dispositivos de regulación de presión expondría el sistema a presiones excesivas.
2. En sitios donde las presiones estáticas y dinámica del agua son altas y donde existe el potencial de golpes de ariete.
3. En lugares del sistema donde una columna de agua movimiento puede cambiar de dirección de repente (una válvula check en el lado de descarga que se cierra de repente al apagar la bomba), o en tramos bajos del sistema que pueden llenarse de agua.

b.- Las válvulas de alivio de aire y de vacío

Por varias razones, es preciso instalar válvulas de alivio de aire y vacío en los puntos más altos de las líneas de suministro, las tuberías principales, las líneas secundarias, los elevadores de control y cualquier otro punto alto, incluso en un lateral.

Criterios para el diseño de un sistema SDI.

1. Para permitir el escape de aire cuando las tuberías están llenas de agua.
2. Para permitir la entrada de aire a las tuberías cuando se drena el agua.
3. Para eliminar las bolsas de aire que pueden quedar atrapadas en los puntos altos del sistema.
4. Para prevenir la formación de vacío en los laterales después de apagar el sistema. Esto es crítico en los sistemas SDI ya que el vacío generado da lugar a la absorción de partículas finas de tierra por los emisores, lo que puede dejarlos atascados.



Modificación de las Demandas Evapotranspirativas en Cultivos Hortícolas con Sistema de Riego Subsuperficial.

El método más simple para seleccionar el tamaño adecuado de las válvulas de alivio de aire y de vacío, indica que el diámetro abierto y libre de la válvula de alivio de aire-vacío debe medir al menos 0.25 del diámetro interno del tubo (la llamada "regla de cuatro-a-uno"). Una alternativa a esta regla consiste en calcular el volumen del aire atrapado en la tubería e instalar una válvula del tamaño adecuado para sacar esa cantidad de aire atrapado sin aumentar significativamente la presión.

Determinación del Movimiento Lateral del Agua desde el Punto de Emisión

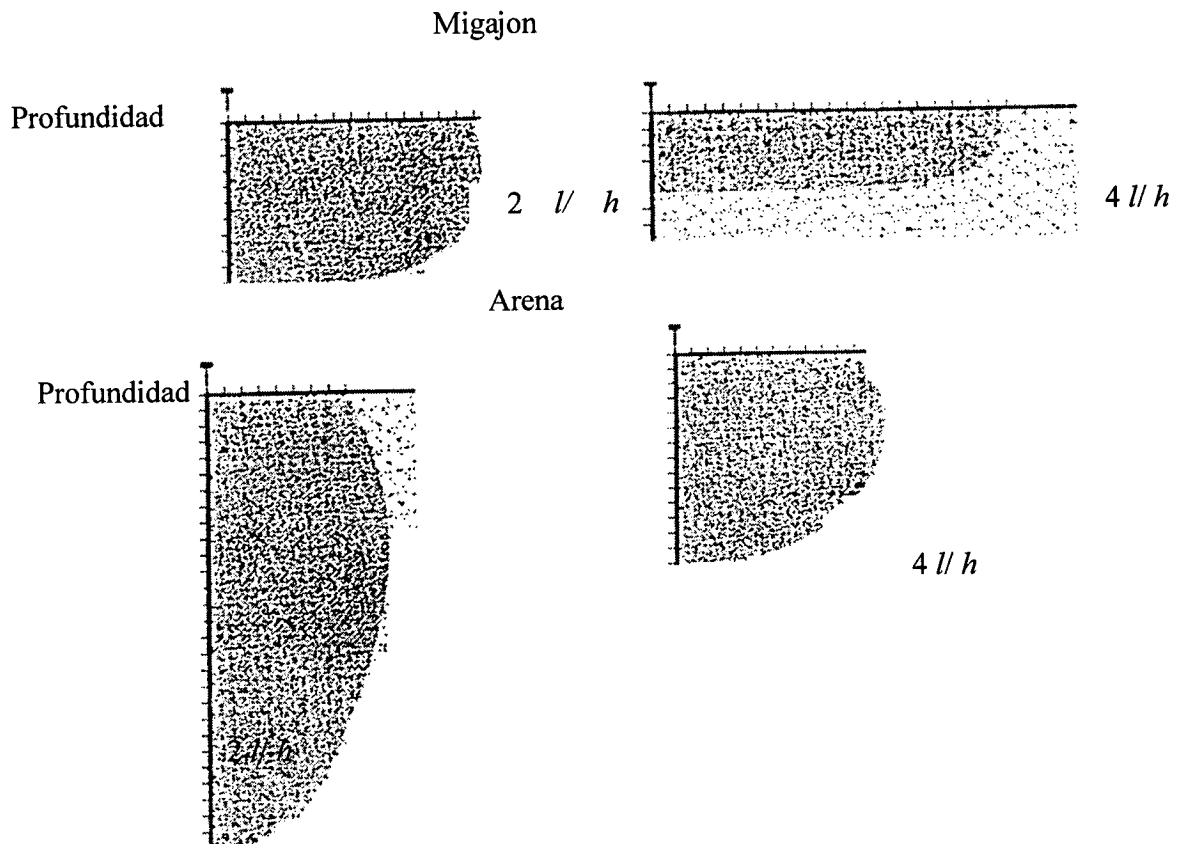
Los sistemas de cinta de goteo y de goteo individual, dependen de las fuerzas combinadas de gravedad y capilaridad para mover el agua lateralmente y hacia abajo, a través del volumen de suelo explorado por las raíces. Es importante, que suficientes emisores, apropiadamente espaciados, sean proporcionados para las plantas con zonas radicales extensas. Para incrementar el movimiento lateral del agua en suelos arenosos, aplicar el agua lentamente a base de flujo lento. Aún así, los suelos arenosos, tienden a tener patrones de humedecimientos profundos y estrechos. Inversamente, los suelos arcillosos, requieren más altas tasas de aplicación para incrementar el movimiento del agua hacia abajo, saturando el suelo durante un periodo breve. Las precauciones deben tomarse para asegurar que los suelos arcillosos no se encharquen por saturación excesiva. La magnitud del movimiento lateral alcanzable será determinada por la tasa de flujo y duración de la aplicación. Para obtener el movimiento lateral deseado puede ser necesario en algunos casos, aplicar suficiente irrigación que extienda la profundidad de la humedad más allá de la profundidad de las raíces del cultivo. Sin embargo, si éste es continuamente el caso, el sistema debe ser cambiado para reducir el lixiviado excesivo. Los cultivos de enraizado somero con zonas radicales de amplia distribución, requieren espaciamientos de emisor más cercanos para asegurar que suficiente volumen radicular es mojado. Los valores del movimiento lateral del agua, dados en el cuadro 1, son para sistemas de goteo individual, operando sobre la superficie. Estos son valores máximos asumidos para cultivos de raíces profundas con la combinación correcta de tasa de aplicación y duración del riego. Los números mostrados son muy generales y deben ser verificados por la experiencia de campo. Las capas impermeables en el suelo tales como capa arcillosa y dura debajo de terreno blando, pueden incrementar la distribución lateral, mientras que otras condiciones pueden reducirla drásticamente. El diseñador puede tener que ajustar la separación entre emisores para condiciones específicas de sitio. (Van Der, 1999)



Cuadro 1: Movimiento del agua en suelos de superficie

Tipo de suelo	Punto de origen de los emisores	
	Movimiento lateral	
	Suelo superficial < 61 cm	Profundidad del suelo > 61 cm
	m	m
Arena gruesa	0.15	0.46
Arena fina	0.23	0.76
Arena arcillosa	0.31	0.91
Aluvión arcilloso	0.31	0.91
Arenoso arcilloso	0.38	1.06
Arcilla	0.46	1.22

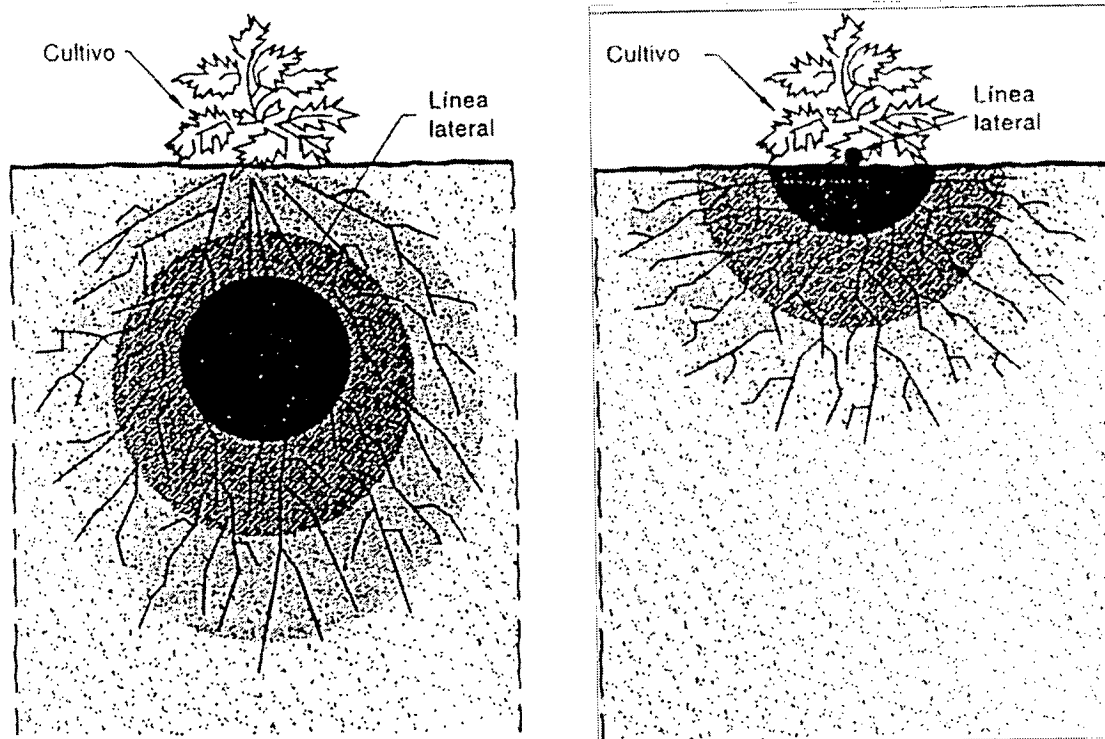
Figura 3: Movilidad del agua en el suelo para los sistemas con goteo





La figura 2 describe gráficamente el movimiento del agua en el suelo, desde un sistema de goteo convencional, operando por encima de la superficie del suelo. Observa que los emisores con más altas tasas de flujo tenderán a mover el agua más horizontalmente en suelos pesados, que los emisores de más baja tasa de flujo. En suelos ligeros, el movimiento lateral entre diferentes tasas de flujo por emisor no es tan significativo.

Figura 4: Comparación del volumen humedecido de suelo.



Sistemas Superficiales Vs. Subsuperficiales

Un emisor subsuperficial que aplique la misma cantidad de agua durante la misma duración que un emisor superficial, tendrá un volumen de suelo humedecido mucho más grande. Por lo mismo, menos volumen de suelo será saturado, dejando más volumen de suelo con una aceptable relación aire humedad. La Fig. 3 muestra la diferencia en volumen de suelo humedecido que puede ser obtenida para que un emisor instalado sobre el terreno comparado con uno instalado debajo de la superficie del suelo.



Hortalizas

Cuadro 2: Muestra algunas sugerencias para determinar el número de emisores de acuerdo al cultivo.

Tipo de cultivo	Numero mínimo de emisores
Hortalizas (hilera simple)	Sistema con cinta de goteo o manguera PB con goteo integrado. La separación de orificios no debe exceder de 1.5 veces la separación de la planta a lo largo de la hilera.
Hortalizas (hilera doble)	Sistema con cinta de goteo. Espaciamiento de los goteros no mayor que el espaciamiento entre plantas a lo largo de la doble hilera.
Hortalizas(en camas)	Cinta con goteo: 1 lateral por cama; 2 laterales por cama de 1 m de ancho o mas amplia.
Fresas	Sistema de cinta de goteo. La separación entre orificios no debería exceder 24 pulgadas. Un espaciamiento de 12" es recomendable
Frambuesas.	Emisores de goteo individual se espacian cada dos plantas. El espaciamiento de los emisores, puede ser hasta 1.5 m. de separación en suelos pesados. Los emisores integrados en la línea lateral se espacian colocando uno por planta. En climas muy secos usar dos emisores por planta
Zarzamora.	Usar emisores de goteo individual. El esparcimiento de emisores se ajustan al espaciado entre plantas

Mantenimiento del sistema

Los sistemas SDI usualmente usan productos de 8-12 mil. Estos productos son adecuados para enterrado más profundo. El producto muy delgado de 4 mil puede utilizarse si el sistema proyectado va a durar solamente una estación, se entierra cerca de la superficie en suelo arenoso, sin rocas y es fumigado para matar las plagas del suelo.

La cinta de mayor espesor (15 mil) ofrece ciertas ventajas tales como permitir presiones más altas de operación para incrementar la velocidad de purgado de las laterales y más facilidad para retirarla del campo, después de la estación del cultivo. Aunque la cinta no puede romperse durante la instalación o traslado la descarga de la cinta puede cambiar debido a elongación o a



Modificación de las Demandas Evapotranspirativas en Cultivos Hortícolas con Sistema de Riego Subsuperficial.

estiramiento. Las cintas pueden estirarse desde 120% hasta 150% de sus longitudes originales debido a la tensión. El coeficiente de manufactura (C_v) de la cinta puede también ser alterado debido a elongación, modificando las características de funcionamiento del producto.

Aplastamiento

Inmediatamente, después de la filtración la cinta enterrada de pared delgada debe ser conectada a la llave del agua y puesto en operación para prevenir que la línea se quede aplastada y plana por el peso del suelo encima de ella. En ciertos casos la línea debería también estar funcionando una vez por semana, aunque la irrigación no sea requerida, para evitar el aplastamiento. Las cintas con paredes muy delgadas, 4 mil o menos, no son recomendables para el enterrado en suelos que forman grandes terrones. Esta cinta, no puede ser presurizada lo suficiente para vencer la fuerza de aplastamiento causado por los terrones del suelo.

Donde los terrones de suelo aplastan la cinta, ésta puede tomar 24 horas de humedecimiento para que los terrones se ablanden lo suficiente y la obstrucción desaparezca.

Encharcado Superficial

Los tiempos de operación muy largos requeridos para cultivos perennes pueden ocasionar erupción del agua hacia la superficie del suelo vía la zanja de instalación más bien que distribuyendo alrededor del emisor.

Insectos

Varios plaguicidas pueden ser usados para matar los insectos del suelo que puedan bloquear la salida de los emisores. Las instrucciones de empleo del químico deben revisarse para asegurar que el químico está aprobado para este propósito.

Mordiscos de Ardillas y Roedores

Las ardillas de tierra y otros roedores no son usualmente un problema significativo. Para reducir el riesgo, las líneas deben ser enterradas a 450 mm de profundidad. También asegurar



que el área mojada de cada emisor traslape de tal forma que la línea entera esté dentro del suelo humedecido. Las ardillas prefieren cavar en suelo seco.

Tratamientos a realizar

Tomando en cuenta que no disponemos de la posibilidad de controlar visualmente el correcto funcionamiento de los emisores por estar enterrados, conviene tener en cuenta algunos aspectos prácticos que evitaran problemas de funcionamiento de este sistema.

Control periódico de los caudales habituales de riego por válvulas o sectores, para garantizar el rendimiento adecuado de los emisores.

Limpieza periódica de los laterales dependiendo de la calidad del agua. Incorporamos ácido nítrico hasta alcanzar un pH 4 ó 4,5 y abrimos las válvulas de limpieza de los extremos de las líneas de riego, si no dispusiéramos de válvulas de drenaje.

- Primeramente debemos destacar que, cuando el pH del agua utilizada sea mayor de 7, debemos tratar con una disolución de ácido nítrico o fosfórico para evitar la formación de precipitados de carbonatos, no bajando nunca de pH 5. De esta manera mantendremos la instalación limpia. Como práctica para evitar el fenómeno de intrusión radicular en los goteros se recomienda un adecuado manejo del sistema mediante aplicaciones de herbicidas, Treflan principalmente, cuya materia activa es la trifluralina. En los cultivos que este registrada tal aplicación para evitar la introducción de raíces en los emisores. Cuando regamos a intervalos espaciados y se producen periodos secos entre riegos, así como en suelos arenosos y laterales ubicados superficialmente, el riesgo de que las raíces obstruyan el paso de los emisores es más alto. (Lamm, F. 2000)

Algunos de los fabricantes están ahora localizando los emisores alejados de las costuras en la cinta de goteo, ya que las raíces tienden a desarrollar a lo largo de las costuras. La intrusión de raíces puede ser rápida en suelos secos. Esto puede minimizarse con irrigaciones frecuentes y eliminar cualquier déficit de irrigación. El uso frecuente de fertilizantes acidificantes también ayuda a prevenir la intrusión de raíces dentro del orificio del emisor. La intrusión de raíces es más común en cultivos tales como apio, espárrago y papa dulce.



Modificación de las Demandas Evapotranspirativas en Cultivos Hortícolas con Sistema de Riego Subsuperficial.

Se pueden utilizar compuestos químicos para reducir la intrusión de raíces. Las medidas de prevención pueden consistir en tomar semanalmente la caída del pH para bajar los niveles durante cortos períodos de tiempo. Un control apropiado solamente puede hacerse en pequeños bloques, debido al tiempo que tarda el químico en viajar a través de la unidad. El bajo pH por largos períodos de tiempo pudiera causar daño en las plantas. En suelos arenosos dosis mensuales de treflan de 0,1 gr./gotero y en suelos francos o arcillosos realizamos dos aplicaciones al año de 0,25 gr./gotero. Al cabo de tres años no se encuentran raíces en la zona próxima al gotero y la concentración de Triflourina es de 0,6 a 2,5 ppm en el suelo, lo que no representa peligro para los cultivos siempre que esto ocurra en la zona próxima del gotero. Hay también una cinta comercial disponible que tiene herbicida Treflan impregnado dentro del emisor. El Treflan es lentamente liberado en el agua de irrigación y descargado en el suelo, evitando que las raíces penetren en el orificio del emisor. (Van Der, 1999)

Una vez que las raíces han penetrado dentro del emisor no hay mucho que pueda hacerse y el sistema taponeado debe ser reemplazado

- Finalmente, siempre hay que realizar un control periódico de los caudales habituales de riego por válvulas o sectores, para garantizarel rendimiento adecuado de los emisores.
- Los problemas de infiltración del agua son también afectados por la salinidad total del agua (CE) y el contenido de sodio relativo. El contenido de sodio relativo es medido a través de un valor llamado RAS (Relación de Adsorción de Sodio). Para información adicional sobre RAS. Añadir calcio al agua de irrigación puede ser de cierto beneficio.
- Si la CE del agua de irrigación es muy baja « 0.6 ds/m) la inyección continua de partículas finas de yeso a dosis de 2.5 meq/l (590 libras por acre-pié) posiblemente ayudará. Las dosis más bajas que esto son generalmente ineficientes. Si el problema ha sido empeorado y continua agravándose a dosis tan altas como 5.0 meq/l durante 6-8 semanas, entonces lentamente reduzca la dosis a través del tiempo para lograr algún beneficio.
- Si la relación calcio-magnesio del agua es menor de 1: 1. el yeso puede ser añadido hasta incrementar la relación tan alta como 2: 1.
- Si el agua contiene un alto nivel de bicarbonatos y el pH del suelo es más alto que 6.5. un ácido puede ser añadido para bajar el pH del agua. Los suelos que tienen un pH más bajo



Modificación de las Demandas Evapotranspirativas en Cultivos Hortícolas con Sistema de Riego Subsuperficial.

que 6.5 transformarán el bicarbonato naturalmente en CO_2 en el suelo.

- Los fertilizantes con calcio y nitrato en lugar de sodio y amonio deberán ser usados.

Las siguientes técnicas de manejo son sugeridas para mejorar el funcionamiento de los sistemas SDI, en cultivos permanentes. Los cultivos de hilera anuales están bien adaptados a los sistemas SDI, y pueden no experimentar el mismo tipo de problemas ya que la cinta solamente necesita funcionar por una estación.

El Fertirriego

La principal función de un aparato de quimigación es controlar y mantener la proporción de las distintas sustancias químicas inyectadas en el agua de riego. La inyección de varias sustancias se emplea para:

1. Ajustar el pH del agua de riego antes de la inyección de sustancias que previenen los precipitados químicos.
2. Dosificar los fertilizantes químicos y ácidos que mantienen limpios los emisores y proveen los nutrimentos necesarios a las plantas.
3. Introducir el cloro (líquido o gas) que previene la acumulación de fango biológico y el bloqueo de los emisores SDI

Los aparatos de quimigación constan de seis componentes:

- La computadora de flujo y el controlador de pulsos químicos.
- El medidor de conductividad eléctrica (EC_w) y bulbo medidor de la conductividad colocado en aguas abajo de la cámara de mezclado de los químicos.
- Tres bombas de inyección de fertilizante
- Tres o cuatro puertos de inyección de fertilizante (válvulas unidireccionales) usados para controlar la inyección de nutrimentos en la tubería. Los puertos de inyección se ubican cerca del puerto de inyección de cloro para ácidos y aguas abajo del filtro en los puertos para ácido fosfórico y otros fertilizantes
- Los tanques para fertilizante . Cada tanque debe estar equipado con una válvula de bola manual y los tanques para el N-pHURIC (Formulación de fertilizante que combina la urea



Modificación de las Demandas Evapotranspirativas en Cultivos Hortícolas con Sistema de Riego Subsuperficial.

con el ácido sulfúrico) y los fertilizantes también deben tener un pequeño filtro de plástico con cedazo

- El medidor y la bomba de cloración. El sistema de monitoreo y control también puede determinar cuándo y por cuánto tiempo se debe fertilizar y/o clorar. Cuando es posible, se debe hacer un análisis cuidadoso del agua antes de hacer el diseño y el cambio a la microirrigación.

a.- Problemas químicos: Analizar el agua frecuentemente para determinar pH, EC_w, RAS, la concentración de hierro. La proporción de Ca + Mg contra carbonatos + bicarbonatos y el contenido de manganeso y de ácido sulfúrico. Luego acidificar hasta pH 6.0-6.5, según la necesidad y lavados frecuentemente:

b.- Problemas biológicos: Determinar mediante análisis los conteos bacterianos y/o de algas y acidificar si el pH está arriba de 7.0; luego clorar y lavar. La cloración después de regar es el principal medio para controlar la actividad microbiana,. (Se debe medir el cloro residual al final del lateral más retirado 30 minutos después de la inyección. El valor debe estar alrededor de 2 ppm).

c.- Factores combinados: A menudo los dos problemas anteriores se combinan con detalles físicos que hacen el tratamiento aún más complejo. Si hay dudas, un sistema de filtración efectivo con mallas de seguridad, la selección de emisores con grandes orificios para el flujo turbulento, la acidificación del agua, la cloración frecuente y el lavado de los laterales también seguido, normalmente controlan los problemas que se presentan en la agricultura de riego.

La cloración

La cloración es el principal medio de control de la actividad microbiana en el agua de riego. La química y los principios de aplicación de cloración son los mismos que para una alberca. Hay presentaciones en forma líquida, sólida y gaseosa. La efectividad de la cloración se comprueba mediante la medición de concentraciones de "cloro libre residual o disponible, porque es el principal bactericida. Se pueden usar equipos de prueba para albercas para medir la eficacia del sistema de cloración. Es mejor aplicar el cloro al final de la irrigación cuando el sistema no está realizando la fertirrigación. Una concentración residual de 1 a 2 ppm al final



Modificación de las Demandas Evapotranspirativas en Cultivos Hortícolas con Sistema de Riego Subsuperficial.

de los laterales 30 minutos después de terminar la cloración basta para controlar la mayor parte de los organismos biológicos en los sistemas de riego. En algunos casos en que el agua contiene mucha materia biológica habrá que aumentar la inyección hasta 10 ppm y, mediante el método del ensayo y error, obtener los residuos adecuados de 1- 2 ppm, a los 30 minutos de tiempo de contacto. Si primero se aumenta la acidez del agua a $\text{pH} < 7.0$ la eficacia de la cloración también será mayor. Es preciso inyectar el cloro antes del filtro, para poder eliminar mediante ese filtro el hidróxido férrico que puede precipitarse durante la oxidación, del hierro soluble a su forma férrica. Los operadores de sistemas grandes han probado que largo plazo es más económico usar el cloro en forma de gas. (Phene, 2000)

Cuadro 3 Presentaciones comerciales de cloro y las cantidades requeridas para tratar 1 acre-pie de agua y lograr una concentración de cloro de 1 ppm

Sustancia química	Cantidad equivalente	Cantidad para tratamiento :1,233 m ³ a 1 mg/l de Cl ₂
Gas cloro	454 g	1,226 g
Hipoclorito de calcio (65-70 % de Cl disponible)	681 g	1,816 g
Hipoclorito de sodio		
15 % de Cl disponible	2.54 l	6.81 l
10 % de Cl disponible	3.78 l	10.22 l
5 % de Cl disponible	7.57 l	21,44 l

El riego subterráneo

Ventajas del riego por goteo

El SDI presenta algunas ventajas frente al riego por goteo convencional : produce una reducción de la evapotranspiración del cultivo como consecuencia de la disminución de la pérdida de agua por evaporación y un mayor volumen de suelo mojado (Phene, 1995). Según Phene et al. (1989) aumenta la eficiencia del uso del agua sin reducir la producción. También



Modificación de las Demandas Evapotranspirativas en Cultivos Hortícolas con Sistema de Riego Subsuperficial.

se ha visto que minimiza la percolación profunda y el lavado del N nítrico (Philip, 1991; Phene and Ruskin, 1995) y otras sales. Por otro lado, mejora las condiciones del uso de aguas salinas al situar las sales por debajo del sistema radical (Oron et al, 1995).

Según Medina (1997), las principales ventajas del sistema son:

- ✓ Evaporación mínima y menor enfriamiento de la superficie del suelo.
- ✓ Percolación despreciable de agua y sales solubles bajo la zona radicular.
- ✓ Sistema radicular más profundo y menores pérdidas de nitratos bajo la zona radical.
- ✓ Ausencia de escurrimientos.
- ✓ Menor incidencia de enfermedades. Evitamos la humedad en la base de la planta, en hortalizas de hoja como lechuga, apio etc. evitamos mojar las hojas de la base. Además, podemos aplicar fungicidas sistémicos a través del sistema de riego incrementando su eficacia.

Si se compara el sistema localizado subterráneo, con el riego por goteo superficial se pueden considerar, según Phene (2000), que reúne las siguientes ventajas:

- I. Al tener una cima de 15-20 centímetro de terreno seco no existirá evaporación.
- II. Cualquier superficie de tierra que normalmente tiene problemas de infiltración, tienen solución con este sistema.
- III. Los sistemas de riego por goteo subterráneo no se cambian anualmente. Ya que el sistema no está expuesto a la luz del sol, y no está sujeto al constante mojado y secado, por lo que se espera que el sistema dure más tiempo que uno que está en la superficie y expuesto al ambiente cambiante.
- IV. Los equipos que transitan en el campo, tendrán menos dificultades en su desplazamiento, porque todas las cañerías y laterales son enterradas.
- V. El agua y nutrientes son directamente aplicados a la zona radicular, aumentando la eficiencia de utilización.



VI. La aplicación de fumigantes y / o pesticidas a través del sistema proporciona el uso eficiente de los químicos para el control de malezas.

Desventajas del riego subterráneo

1. La poca humidificación de la capa superior del suelo, lo que exige con frecuencia que se realice la irrigación por aspersión cuando la humedad de la primavera no es suficiente para que broten las plantas
2. En ocasiones, una parte del agua se escapa por debajo de la capa activa del suelo.
3. La utilización limitada en suelos salinos
4. Un control deficiente del trabajo de los humidificadores.
5. Un alto costo del sistema de riego.

Problemas que han limitado la adopción extendida del riego localizado subterráneo.

- A. La inspección del sistema es difícil y el usuario no puede evaluar las condiciones.
- B. El equipo de riego subterráneo es difícil de mantener y reparar, y por consiguiente los agricultores han evitado su uso.
- C. La obstrucción de raíces, precipitados y otros materiales causarían un funcionamiento defectuoso del sistema.

Aunque desde hace tiempo se viene ensayando diversos sistemas de riego subterráneo, no ha sido hasta los últimos años cuando parecen experimentar un crecimiento digno de consideración (Medina 1997).

Con el advenimiento de la mejora de materiales de plástico, el sistema ahora es económicamente factible, para muchas cosechas, incluso para cultivos como el algodón y maíz (Jorgesen y Norum 1993).

El uso del riego por goteo subterráneo puede ser el futuro del riego en los próximos años y décadas. Éste empieza a tomarse en cuenta en los proyectos de riego de cultivos extensivos (Zoldoske 2000).



Evaluación de la Tecnología SDI

La irrigación subsuperficial de goteo puede ofrecer beneficios a los productores que incluyen:

- Menos evaporación superficial.
- Reduce el daño por conejos, coyotes y ratones que mastican las laterales.
- Reduce la cristalización de sales sobre el orificio del emisor en áreas con alto contenido de sales en el suministro de agua.
- Menos interferencia con la ejecución de las operaciones de campo con el sistema en su lugar, aun con el sistema operando.
- Cubre un volumen de suelo humedecido mucho mas grande con la misma cantidad de agua que los suelos superficiales (hasta 40%), reduciendo la cantidad de suelo saturado en la zona radical y la cantidad de agua perdida por percolación profunda.

Existen también cuestiones por resolver, asociadas con el enterrado de las líneas de riego por goteo. Estas incluyen:

- El agua es entubada hasta la superficie del suelo, a través de "chimeneas" que se forman por el flujo repentino de partículas de arena y arcilla cercanas a la salida del emisor ya través de una vía vertical hasta la superficie del suelo.
- La intrusión de raíces taponea el emisor.
- El flujo es restringido por las líneas laterales apretadas después de la instalación o como un resultado de la compactación del suelo a través del tiempo.
- Las tasas de flujo son reducidas en emisores enterrados de un 10-20% debido a la presión hidráulica que se forma en el suelo saturado alrededor del emisor.
- No es fácil revisar el sistema visualmente para determinar si está operando adecuadamente.

Sistemas de monitoreo SDI

Un medidor de caudal y un manómetro deben estar instalados con el nuevo sistema. Un medidor estándar de flujo y presión pueden entonces instalarse en cada unidad. Un calendario



Modificación de las Demandas Evapotranspirativas en Cultivos Hortícolas con Sistema de Riego Subsuperficial.

de monitores debería establecerse para determinar si ocurre reducción en los caudales de un año a otro año.

La presión debe ser medida en una localización apropiada sobre la línea para obtener resultados con fiables y repetibles. La mejor posición es una sección recta de tubería que esté después de la válvula de control de la línea principal, pero antes del medidor de flujo del sistema. El flujo debería ser revisado al transcurrir unas pocas semanas. Si se observa más de un 5% de variación en flujo el sistema debería revisarse.

Si la tasa de flujo se ha incrementado, revisar lo siguiente:

- Existen algunas fugas en el sistema.
- Si los emisores instalados son de flujo laminar o turbulento y no hay fugas, revisar los reguladores de presión para verificar que la presión de operación dentro de las unidades no ha "Subido". Con emisores de flujo laminar o turbulento, un incremento en el flujo usualmente indica una lateral quebrada o rota, fugas en la tubería o un medidor de flujo defectuoso.
- Si los emisores son compensadores de presión y no hay fugas, excava y busca la línea de emisores para ver si el diafragma perdió sensibilidad y se mantiene abierto por partículas extrañas. Si no revisa el caudal de goteros individuales para evaluar endurecimiento del diafragma.

Si la tasa de flujo ha disminuido revisar lo siguiente:

- Visualmente observar todo el equipo, especialmente. los medidores de caudal, los manómetros y los reguladores para verificar que ellos están trabajando correctamente.
- Si el equipo de monitoreo está funcionando correctamente, entonces es muy probable que al menos algunos de los emisores están parcialmente taponeados u obstruidos.
- Limpie el sistema inyectando soluciones con cloro o ácido.
- Si el caudal no se restablece, entonces un tramo de la línea de emisores debería ser desenterrada por excavación profunda e inspeccionada para ver qué está causando el



problema. Seleccionar un tramo cerca del extremo final de la lateral, ya que aquí es donde el taponamiento generalmente se inicia con mayor frecuencia.

El sistema de monitoreo y control del riego:

Ya que el alto desempeño de los sistemas SDI proviene del uso del riego de alta frecuencia y de la fertirrigación, casi siempre precisan de la automatización con monitoreo en tiempo real mediante varios sensores de retroalimentación y dispositivos de control. La satisfacción de la demanda de agua que provoca la evapotranspiración del cultivo cambia tan rápidamente que es necesario contar con cierta instrumentación para monitorear las condiciones de clima en tiempo real de tal manera que el programa de riego pueda ajustarse de inmediato y sin las demoras de la intervención humana. Los sistemas SDI y el agua que aplican no están a la vista como en la mayoría de los métodos de irrigación, así que para asegurar una adecuada operación se requieren la medición continua del flujo y de la presión del agua para determinar la disponibilidad de agua y detectar líneas rotas y/o pequeños cambios que pudieran ser causados por tapones debido a la invasión de raíces, la acumulación de tierra en la ruta de flujo de los emisores, el crecimiento biológico o los precipitados químicos. El control de las variaciones en la calidad del agua debido a cambios de fuente y la mezcla de aguas de diferente origen también requiere medición en tiempo real de pH, temperatura y EC_w . El usuario debe estar dispuesto a instalar un sistema de monitoreo diario por computadora vía modem o radio-frecuencia, a generar bases de datos para archivar los registros y a los cambios progresivos en el manejo del sistema.

El sistema de levantamiento de datos y control de riego consta de una computadora automatizada en "tiempo real," el software de monitoreo y control, los instrumentos de medición de los diversos factores (tanque de evaporación o estación climatológica, sensores de la humedad del suelo, velocidad del viento, medidores de flujo y de las presiones del agua, temperaturas, precipitación, etc...), y los controles de salida de tres vías (válvulas solenoides, retrolavado de filtros, inyector de fertilizante, etc...). En este caso, la programación del riego depende de la lectura continua del instrumento de monitoreo (el tanque de evaporación), instalado en un tanque de evaporación de acero inoxidable de calibre 18 con cedazo con



Modificación de las Demandas Evapotranspirativas en Cultivos Hortícolas con Sistema de Riego Subsuperficial.

válvulas automáticas de llenado y vaciado y de la temperatura del agua en el tanque. El programa de software está instalado en el sistema de monitoreo y control.

En ocasiones, los cálculos de evapotranspiración en el sistema deben ajustarse hacia arriba o abajo porque los coeficientes del cultivo (K_e) son afectados por el sitio y por la variedad. Se instalan tres (o más) sensores electrónicos de la humedad y temperatura del suelo a la misma profundidad, a unos 15 cm de distancia de la línea de goteo que pasa entre los dos emisores. Su tasa de cambio es vigilada por el sistema de monitoreo y control para determinar si el suelo se está secando o humedeciendo ligeramente.

Un sensor de flujo electromagnético tipo rueda con aletas (Seaflow) mide el flujo de agua para el sistema de monitoreo y control y la computadora Seaflow (Seaflow FT 400). El sistema de monitoreo y control también registra el gasto hidráulico, el flujo total por hora y el gasto diario.

Tres sensores adicionales miden otras variables del clima: un anemómetro, un detector de dirección del viento y un medidor de lluvias. La velocidad y dirección del aire y la precipitación son registradas cada hora y usadas en la interpretación de las lecturas tomadas cada hora y cada día. El anemómetro y el detector de dirección del aire miden la velocidad horizontal del viento (0 -160 km/hr) y su dirección. El medidor de lluvia tipo "cubeta ladeada" puede medir la precipitación hasta una intensidad de 50 mm/hora con una exactitud del 1 % y una resolución de 0.1 mm/tip. Las presiones del sistema son registradas cada minuto durante el riego automático y una vez por hora cuando el riego es manual. Además, se instalan indicadores de presión en cada punto de lavado. Para que el sistema SDI descargue agua de manera uniforme, la presión al final de los laterales debe ser pareja y no menor a 1.03 kg/cm^2 .

Aunque se programa el sistema para operar en forma independiente, el usuario siempre puede tomar control de todas las funciones automáticas al mover unos de los interruptores de tres vías, de automático, a manual o a apagado. Es importante recordar que como usuario, una vez configurados algunos de los parámetros iniciales (como el flujo mínimo y máximo y los rangos de presión) casi nunca será necesario ajustar el sistema de monitoreo y control, excepto para mover algún interruptor de una posición a otra si desea manejar el sistema manualmente.



El acceso remoto al sistema de monitoreo y control se efectúa por teléfono y permite hacer lo siguiente:

1. Bajar los datos por horas almacenados en el sistema de monitoreo y control.
2. Cargar nuevo software o cambios de software.
3. Modificar varios parámetros y funciones de control y monitoreo.
4. Monitorear el sistema de riego en tiempo real.

Resultados de investigación

Profundidad de instalación del gotero

Jorgenson y Norum (1993), señalan que las profundidades de instalación reducen el potencial para la evaporación desde la tierra y también permiten una mayor facilidad para realizar prácticas de cultivo. Sin embargo las instalaciones más profundas pueden limitar la efectividad del sistema de riego subterráneo en la germinación de semillas, restringiendo la disponibilidad de agua y nutrientes hacia la superficie, pudiendo provocar salinidad cuando se riega con agua con sales.

Las profundidades de instalación típicas son 30 y 60 cm, pero la profundidad óptima es desconocida, y la experiencia dictará cuál es la mejor. Lo más probable, es que exista más de una profundidad óptima (Burt y Styles 1994).

Una instalación de riego por goteo subterráneo no difiere mucho de la convencional, salvo que los laterales portagoteros se entierran y conectan a tuberías por sus dos extremos: una sirve de alimentación (terciaria) y la otra de colector para la limpieza de las tuberías. Existen equipos que entierran las tuberías laterales a las profundidades requeridas, que suelen ser:



Modificación de las Demandas Evapotranspirativas en Cultivos Hortícolas con Sistema de Riego Subsuperficial.

Algodón.....	40 cm
Forrajeras.....	30-40 cm
Praderas.....	8-10 cm
Frutales y forestales.....	20 cm

La profundidad de enterrado dependerá del tipo de cinta utilizada, cultivo desarrollado y condiciones de suelo. Típicamente, la profundidad de enterrado está entre 100-600 mm (4"-24"). La profundidad óptima para cada cultivo y condición de suelo dependerá de:

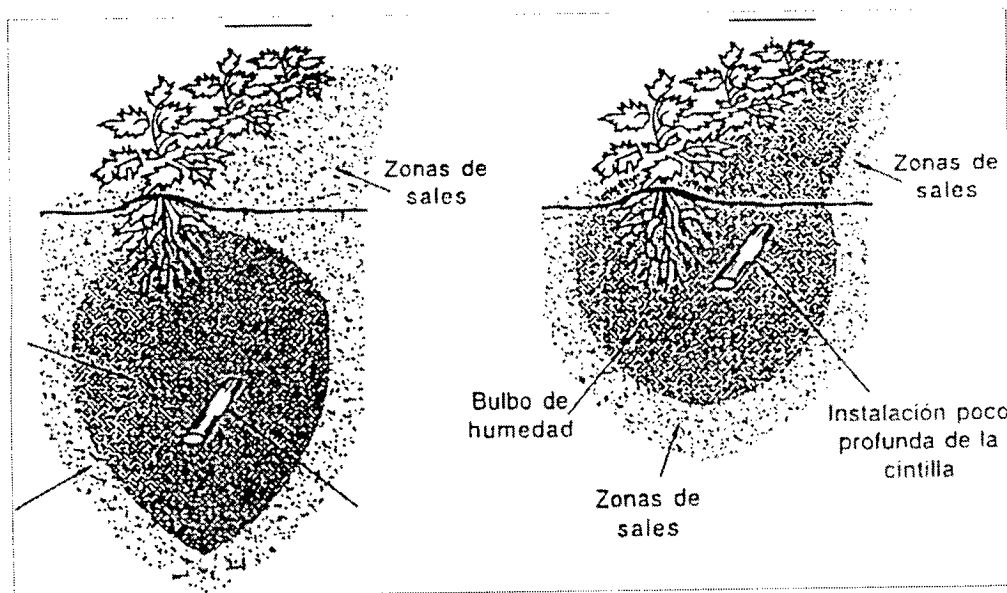
- El tipo de cultivo. Los árboles y viñedos usualmente tendrán instalaciones más profundas ya que la instalación va a durar varios años.
- El movimiento vertical del agua a través del perfil del suelo. La probabilidad de tráfico vehicular sobre la lateral. Un enterrado más profundo protegerá más la lateral.
- Las prácticas de labranza. La lateral debe estar instalada por debajo de la profundidad de corte de los implementos de labranza.
- El patrón de enraizamiento del cultivo. El enterrado más profundo puede ser requerido para evitar que las raíces aprieten o pellizquen las laterales en árboles y viñedos.
- Capas de suelo impermeables o limitantes en el perfil de suelo. El uso de un acolchado plástico afectará la distribución de agua a través del suelo. Las profundidades más superficiales de enterrado pueden ser usadas si el cultivo es acolchado con plástico.

Las instalaciones profundas reducen la evaporación del suelo y también permiten las operaciones de labranza más profundas. Sin embargo, las instalaciones profundas afectarán la germinación de la semilla para cultivos anuales y limitarán la disponibilidad de los nutrientes aplicados en la superficie del suelo.

Si la acumulación de sales en el suelo es un problema, la instalación subsuperficial poco profunda dará mejores resultados que las instalaciones profundas. Las instalaciones profundas que no permiten que el área humedecida toque la superficie del suelo puede causar incremento de sales justo por debajo de la superficie del suelo, en el área radical de la planta.



Figura 5: Instalación de cintilla bajo la superficie del suelo.



La cinta de goteo es usualmente enterrada debajo del suelo o bajo el acolchado para cultivos, desarrollando en camas en relieve. Estos cultivos en hilera son usualmente cultivos anuales y la cinta de goteo puede ser fácilmente instalada y mantenida durante la estación de crecimiento. Sin embargo, para cultivos de viñedos y árboles frutales, los sistemas deben estar diseñados e instalados para operar por muchas estaciones. La operación a largo plazo, hace el enterrado del sistema más riesgoso. La obstrucción de los emisores, la intrusión de raíces, el aplastamiento de las líneas laterales y otros factores hacen la operación de un sistema de goteo enterrado a largo plazo difícil. Para cultivos perennes, el tubín lateral o "manguera" es a menudo usada en lugar de la cinta de pared delgada, ya que un producto con vida útil más largo es requerido.

Para cultivos tales como espárragos, maíz y otros que no están desarrollando en camas con relieve, la profundidad de enterrado es usualmente de 300 mm (12") o más. La profundidad seleccionada debería permitir la ejecución adecuada de las prácticas de labranza en campo sin maltratar las líneas laterales. Ya que éstos cultivos son de enraizado profundo. El agua puede ser apercada a una profundidad más grande, previendo que la germinación puede ser lograda.



Modificación de las Demandas Evapotranspirativas en Cultivos Hortícolas con Sistema de Riego Subsuperficial.

Para cultivos de hilera simple, tales como tomates, pepinos, sandías, etc., la línea de goteo debe estar enterrada de 50-100 mm (2-4") de profundidad y estar colocada a 100-150 mm (4-6") del centro de la cama. Para cultivos de doble hilera tales como berenjena, pimientos, calabaza, etc., la línea de goteo debería estar colocada entre las dos hileras y enterrada de 50-100 mm de profundidad.

Espaciamiento de la línea

Espaciamiento de la línea es a menudo gobernado por la separación entre hileras del cultivo mientras que el espaciamiento de emisores está determinado por la separación entre plantas dentro de la hilera. Los espaciamientos que están muy amplios resultarán en pobre uniformidad y resultarán en un exceso de agua que tiene que ser aplicado para lograr suficiente movimiento lateral del agua. El espaciamiento amplio podría resultar en percolación profunda excesiva para la mayoría de los tipos de suelo. El espaciamiento de líneas debe estar determinado por la estimación de la expansión lateral de la zona radical del cultivo y el movimiento lateral del agua dentro del suelo.

Para cultivos desarrollando en camas menores de 0.75 m de ancho, una línea de goteo debería ser suficiente. Los cultivos desarrollando en camas que son más amplias que 0.75 m pueden requerir más de una línea de goteo por cama: El espaciamiento lateral dependerá de la profundidad de enraizado del cultivo, acolchado y factores del suelo. La Tabla 5. 1 puede usarse como una guía para determinar la profundidad de enterrado y espaciamiento de lateral correspondiente para los sistemas SDI.

Limitaciones que opone el suelo al flujo del agua en el riego localizado subterráneo.

Cuando la descarga predeterminada del emisor es más grande que la capacidad de la infiltración del suelo, la presión del agua hacia la salida del gotero aumenta y se vuelve positiva. Esta presión aumenta gradualmente en el suelo, disminuyendo el diferencial de presión al otro lado de la gota que sale del gotero y, subsecuentemente, disminuye la descarga del gotero de manera que depende de la curva característica del gotero, señalan que la variabilidad del suelo puede afectar el flujo de agua emitido desde los goteros enterrados. Esto es porque la presión gradual del agua en el suelo, no es transmitida fácilmente desde los emisores. (Shani et al. 1996).



Expectativas de la tecnología del riego localizado subterráneo

El potencial de esta tecnología en el mercado agronómico está aumentando. Sin embargo, los costos son altos, por lo tanto, siempre es razonable minimizar lo más posible los costos de inversión del sistema, el mismo autor señala que el éxito dependerá en adelante de un conocimiento elevado de variables agronómicas e hidráulicas y un compromiso con respecto a lo requerido por el sistema (instalación, servicio, operación y procedimientos de dirección). (Lamm 2000).

El mismo autor señala que el éxito dependerá en adelante de un conocimiento elevado de variables agronómicas e hidráulicas y un compromiso con respecto a lo requerido por el sistema (instalación, servicio, operación y procedimientos de dirección).



ESTADO DE ARTE

El progresivo aumento del consumo de agua es un aspecto de notable preocupación, sobre todo, en las zonas de escasos recursos hídricos. En los últimos años, se ha impuesto el riego localizado por goteo superficial (RG) que supone una reducción del aporte de agua; en este sentido el riego por goteo subterráneo (SDI) puede ser otra alternativa para mejorar la eficiencia del uso del agua. Con este sistema de riego se han realizado algunos trabajos en plantas hortícolas.

En las dos últimas décadas del siglo XX, la adopción de tecnologías de riego de alta eficiencia o de riego localizado, ha presentado un crecimiento significativo, fundamentalmente por la incorporación de cultivos de alta rentabilidad asociada por lo general, a la actividad de exportación.

En el caso específico de cultivos hortícolas, el desarrollo de la tecnología de riego, no sólo se ha sustentado en aspectos de rentabilidad, sino también en criterios técnicos de manejos de cultivos en relación al agua de riego. Existiendo una necesidad de hacer más eficiente la aplicación y aprovechamiento del agua por parte del cultivo y a la vez de disminuir las pérdidas por evaporación desde el suelo.

El riego por goteo con cinta enterrada es más que solo una herramienta para aplicar agua. En las últimas dos décadas el sistema SDI ha evolucionado hasta constituir un método muy sofisticado con el potencial de aumentar la productividad de los cultivos y la eficiencia en el uso del agua. El riego por goteo con cinta enterrada es el método de irrigación, más reciente más sofisticado y más eficiente disponible ahora. Es capaz de generar mayores rendimientos y un más eficiente uso del agua comparado con cualquier otro método de riego ahora en uso aunque precisa de un manejo intensivo y exacto del agua y de los nutrientes para producir los resultados esperados.



ÁREAS DE OPORTUNIDAD

Con los problemas existentes de escasez de agua, periodos largos sin precipitaciones pluviales o lluvias mal distribuidas durante el desarrollo del cultivo y con el deseo de aprovechar dicho elemento. Para conseguir mejores cosechas, mediante el fertirriego y buen manejo de campo, algunas empresas dedicadas a la producción en campo y ciertos productores particulares han adoptado el riego por goteo con cinta enterrada, debido a las variadas ventajas que nos ofrecen este sistema en el campo. Debido a los factores antes mencionados y con incremento de la población, se necesitan mejorar cada día los sistemas de producción que nos ofrezcan la posibilidad de ahorrar agua en grandes porcentajes, al mismo tiempo obtener mejores rendimientos y de calidad.

Con lo anterior mencionado, el método de irrigación por goteo subsuperficial (SDI), es una tecnología de riego relativamente nueva, que puede ofrecer grandes beneficios a los productores, en comparación con aquellos métodos convencionales de riego. La eficiencia de agua puede ser incrementada, ya sea aumentando el rendimiento o al reducir el agua perdida por la evapotranspiración o ambos.

Varios años de investigación, demuestran que el manejo adecuado del agua y fertilizantes mediante los sistemas SDI, representan los avances para lograr rendimientos mas altos de tomate, maíz dulce, melón, brócoli, algodón, alfalfa, alfalfa, caña de azúcar y árboles de nuez, de alta calidad y por lo tanto con alta rentabilidad y ganancia.

En México se necesita difundir este tipo de sistema, para que los productores lo conozcan, las grandes ventajas que ofrecen, pues la principal es el ahorro de agua.



CONCLUSIONES

- En la actualidad, son varios los sistemas de irrigación que son utilizadas por los productores, las hay desde los métodos mas antiguos, el riego por goteo subsuperficial es el sistema mas avanzado en la actualidad, debido a que unos de los principales problemas que enfrenta la mayoría de los productores en el campo es la escasez de agua, y este método ofrece la gran ventaja que al no estar en contacto el agua directamente con la energía solar, hay una menor perdida de agua por evapotranspiracion.
- En México son pocos los resultados de investigación que se han realizado con este tipo de sistema. En los EE. UU. y España el riego localizado subterráneo esta ampliamente establecido en multitud de cultivos y superficies ajardinadas.

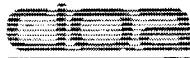
RECOMENDACIONES

- Se necesitan obtener mas resultados de investigaciones de campo en la mayoría de los cultivos, y conocer mas afondo las variables que pueden existir en cada uno de los cultivos al momento de la instalación del sistema de riego subsuperficial.
- Debido a que este sistema de riego apenas se empieza a conocer entre los productores al menos en nuestro país, se necesita difundirlo dando a conocer los resultados de investigación por parte de los investigadores y técnicos especialistas en los sistemas de riego.
- Es necesario tomar que el agua es el vital liquido del ser humano, y debemos cuidar y ahorrar el agua al máximo posible, este sistema nos ofrece esa ventaja de ahorra el agua lo mas que se pueda.



BIBLIOGRAFIA.

- Bucks, D. A. and Nakayama, F. S., 1980. Injection of Fertilizers and Other Chemical for Drip Irrigation. Proc. Agri – Turf Irrig. Conf., Houston, Texas, Irrigation Association, Silver Spring, Maryland.
- Burt, Ch; Styles, S. 1994. Drip and Microirrigation for Trees, Vine, and Row Crops. California, United States of America. ITRC. 261 p.
- De Santa Olalla M, Francisco; De Juan Valero, José. 1993. Agronomía del Riego. Madrid, España. Ediciones Mundi-Prensa. 732 p. (Disponible en la pagina: <http://www.monografias.com/trabajos14/riego-subterr/riego-subterr.shtml>)
- Driscoll, M. A., y Bralts V. F. 1985. Microcomputer Drip Irrigation Designer. Dept of Agricultural Engineering, Michigan State University, East Lansing.
- Gilbert, R. G. and Ford, H. W., 1986. Emitter Clogging. In Nakayama, F. S. and Bucks, D.A. (Eds). Trickle irrigation for Crop Production. Design, Operation and Management Elsevier, New York, Pags 142 pp.
- Jorgensen, G; Norum, K. 1993. Subsurface drip irrigation: Theory, practices and application conference. California, EE.UU. Edited by G. Jorgensen and K. Norum. 216p
- Keller, J. y Karmeli. 1975. Trickle irrigation Design. 1st Ed. Rain Bird Sprinkler Mfg Corp., Glendora, CA; 133 pp.
- Lamm, F. 2000. SDI Reserch en Kansas después de 10 años (en línea). Kansas,Estados Unidos. . Disponible en [http:// www.oznet.ksu.edu/soli/dmsdi.html](http://www.oznet.ksu.edu/soli/dmsdi.html)



- Medina, José. 1997. Riego por Goteo. 4ª ed. Madrid, España. Ediciones Mundi-Prensa. 302 Págs.
- Ocaña Romo. 2006. El agua en la agricultura. Revista Productores de hortalizas. Publicación mayo del 2006. Pag. 66
- Oron, G., DeMalach, Y., Gilleramn, L. and David I. (1995). Pear response to saline water application under subsurface drip irrigation. Proc. 5th Int. Microirrigation Congress, 1: 97-103. Orlando, Florida.
- Phene, C. J. and Ruskin, R. (1995). *Potentials of subsurface drip irrigation for anagement of nitrate in wastewater*. Proc. 5th Int. Microirrigation Congress, 1: 155-167. Orlando, Florida.
- Phene, C.J. 2000. Las ventajas de el riego por goteo subterráneo (en línea). California, Estados Unidos. Consultado 10 Nov. 2000. Disponible en <http://www.geoflow.com/agriculture/phene.htm>
- Phene, J. C. 2000. Memorias del Curso de Fundamentos Técnicos del Riego por Goteo con Cinta Enterrada. Leon, Guanajuato, 2 y 3 de octubre del 2000.
- Phene, C. J., McCormick, R. L., Davis, K. R., Pierro, J. and Meek, D. W. 1989. A lysimeter feedback system for precise evapotranspiration measurement and irrigation control. *Transtions of the ASAE*, 32(2): 477-484.
- Phene, C. J. (1995). The sustainability and potential of subsurface drip irrigation. Proc. 5th Int. Microirrigation Congress, 1: 359-367. Orlando, Florida.
- Philip, J. R. (1991). Effect of root and subirrigation dept on evaporation and percolation losses. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 55: 1520-1523.
- Shani U.; Xue S.; Gordin-Katz R.; y Warrick A.W. 1996. *Journal of irrigation and drenaige engineering*. Volumen 122 N° 5, Sept-Octubre. 291-295p



Modificación de las demandas Evapotranspirativas de cultivos hortícolas con riego subsuperficial

Terrón, P; Hernández., C. 1992. Condiciones del Suelo y Desarrollo de las Plantas Según Ruseell. Madrid, España. Ediciones Mundi-Prensa. 395 p. (Disponible en la pagina : <http://www.monografias.com/trabajos14/riego-subterr/riego-subterr.shtml>)

Van Der, G. T. 1999. Manual de riego localizado por goteo y microaspersión. B.C Ministry of Agricultura and Food, Resource Management Branco and Irrigation Industry Association of British Columbia. 231 Págs

Zoldoske, David. El futuro de el riego subterráneo (en línea). Estados Unidos. Disponible en <http://www.dripin.com/rootguard.htm>



NOMENCLATURA

SDI: riego con cinta enterrada

PE: Polietileno

CE: Conductividad eléctrica

RAS: Relación de Adsorción de Sodio

N-PHURIC: Formulación de fertilizante que combina la urea con el ácido sulfúrico.

Gpm galones por minuto.

h: horas

kg/cm² kilogramos/ centímetro cuadrado

m: metros

l : litros.

mm : milímetros

cm: centímetros

seg: segundos

% : porcentaje

psi: libras/pulgada cuadrada