

Dispositivo de control para la aplicación del riego intermitente

Poliopro Martínez Austria

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, CNA

Alvaro A. Aldama Rodríguez

Princeton University, Nueva Jersey, EUA

El riego intermitente es un nuevo método de aplicación del agua a nivel parcelario para sistemas por gravedad, melgas o surcos, que en determinadas condiciones permite incrementar notablemente la eficiencia en el uso del agua, observándose también mejores perfiles de humedad en el suelo. Por otra parte, la indispensable intermitencia en la aplicación del agua debe ser producida por algún sistema automático. Hoy en día existen en el mercado varios tipos de válvulas electrónicas, cuyo uso es una opción. Sin embargo, hay otras de menor costo y mejor adaptadas a las condiciones generales de México. En este artículo se abordan los principios y criterios de diseño de un dispositivo de descargas intermitentes sencillo y de bajo costo, que puede ser construido y modificado por los agricultores según sus necesidades. Está diseñado para funcionar en surcos cortos, como los que se encuentran en nuestro país. Se ilustran los principios generales de su funcionamiento y, para aquellos interesados, se muestra la derivación de las ecuaciones generales correspondientes. Se presentan los procedimientos y resultados de su validación en el laboratorio y en el campo. De estas experiencias se derivan criterios y recomendaciones para su diseño y operación.

El riego intermitente fue sugerido por primera vez por Stringham y Keller en 1979. Sin exagerar, se puede decir que es la única modificación sustancial en el riego parcelario en muchos años. En efecto, las técnicas de riego por surcos, bordos o inundación, se conocen desde hace mucho tiempo y, si bien se les han añadido mejoras en cuanto a su aplicación, y ahora se puede hacer un diseño parcelario más eficiente, no difieren fundamentalmente de las conocidas desde hace siglos. Por su parte, el riego intermitente introduce cambios cualitativos y cuantitativos, basados en algunas propiedades de la dinámica agua-suelo.

Otra diferencia importante del riego intermitente es que, al contrario de otros tipos de riego por gravedad, en principio no es una técnica conocida por los agricultores y que haya sido mejorada por la ingeniería, sino que es un método concebido y probado inicialmente en las universidades y, por lo

tanto, el fomento de su uso requiere de una amplia difusión y promoción.

El riego intermitente, como el riego por goteo, ha sido desarrollado con el objetivo básico de mejorar la eficiencia en el uso del agua. Con su aplicación se han logrado importantes ahorros –del 20 al 30% (Bishop et al., 1981)– comparado con otras técnicas actuales de riego por gravedad. Se han disminuido considerablemente tanto las pérdidas por percolación profunda como las debidas a coleos, lo que es resultado de una reducción en los tiempos de avance durante el riego, que a su vez se produce por una caída brusca de la capacidad de infiltración del suelo, que disminuye hasta su valor mínimo (Levin y Van Rooyen, 1977). Así, se logran también mejores uniformidades en el perfil de la humedad del suelo.

Por la concepción misma del método, su empleo se basa en el suministro del agua a los surcos o melgas mediante etapas sucesivas

de flujo y suspensión de éste, por lo que se requiere de dispositivos automáticos que permitan la descarga intermitente. El flujo intermitente se consigue mediante dispositivos electrónicos de control automático, de los que ya existen algunos en el mercado. Sin embargo, su costo es elevado, están diseñados para usarse en sistemas de conducción a presión y su manejo es complicado. Por estas razones, no son fácilmente adaptables a las condiciones de la mayoría de los distritos de riego de nuestro país.

Considerando lo anterior, en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), se desarrolló (Martínez-Austria y Aldama, 1989) un dispositivo flúidico para riego intermitente, de operación sencilla y bajo costo, que no requiere de instalaciones especiales. Está compuesto simplemente de un tanque de almacenamiento provisto de sifones, que en conjunto produce las descargas intermitentes deseadas. El dispositivo fue construido y probado en un modelo reducido en los laboratorios del IMTA. Posteriormente, se procedió a su validación en el campo, que se realizó en conjunto con la Universidad Autónoma de Zacatecas (UAZ). En esta etapa se afinaron los detalles que condujeron a criterios y recomendaciones de diseño. Actualmente, se inicia su aplicación a nivel productivo en Fresnillo, Zacatecas.

Descripción del riego intermitente

El método tradicional de riego en surcos se realiza con aplicación continua. El proceso se inicia introduciendo agua al surco por medio de sifones, rompiendo la regadera, o con tubería de compuerta. El agua escurre por efecto de la gravedad, y se puede observar el avance del frente húmedo. Conforme avanza, parte del agua se infiltra en el terreno. En cualquier punto ya mojado, la velocidad de infiltración disminuye con el tiempo.

Si, dadas la infiltración y el gasto, el surco ha sido bien diseñado, llegará un momento en que el flujo alcance el final, para almacenarse si se ha colocado un bordo, o para salir como escurrimiento por los drenes. La etapa de riego en la que el agua aún no alcanza el final de la parcela, se conoce como "fase de avance". La entrada de gasto al surco continúa hasta que se estima que la lámina neta deseada se infiltrará durante el resto del riego. Antes de que el agua alcance el final del surco, se corta en la cabecera. A partir de entonces el flujo disminuye, comenzando el secado al inicio del surco. Esta fase se conoce como "recesión".

El tiempo que existe agua sobre un punto en el surco, y durante el cual se produce infiltración, se

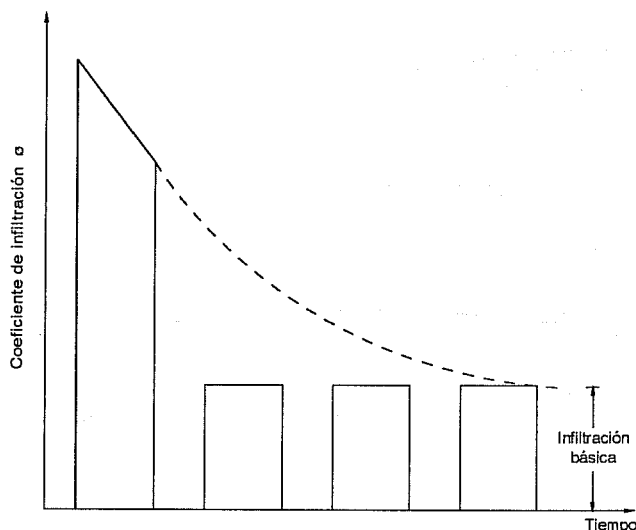
denomina "tiempo de oportunidad". En condiciones ideales, éste debería ser el mismo para todo el surco, con lo que podría obtenerse una uniformidad perfecta. Si, además, el tiempo de oportunidad es el que requiere el suelo para la infiltración en la zona radicular, no habrá pérdidas por infiltración profunda, ni falta de agua para la planta. Desafortunadamente, tales condiciones rara vez pueden conseguirse.

De la descripción anterior se puede deducir que en especial para suelos con alta capacidad de infiltración –arenosos– cuanto más rápida sea la fase de avance, más eficiente será el riego, ya que se reducen al mínimo las diferencias en tiempo de oportunidad entre el principio y el final del surco.

En el riego intermitente se procede de la siguiente manera: se inicia igual que el método tradicional. No obstante, la entrada de agua se corta mucho antes de que se alcance el final del surco, con lo que se inicia una fase de recesión en la zona ya mojada, donde ya se ha producido infiltración. Durante esta fase de recesión el frente húmedo continúa avanzando, pero alcanza una distancia reducida. La suspensión del flujo en la entrada dura un tiempo aproximadamente igual a aquel en el que se produjo el avance. Durante esta etapa de "no riego", en la zona humedecida se produce una fuerte y brusca disminución en el coeficiente de infiltración, que desciende prácticamente a la infiltración básica. En el riego continuo, esta disminución se alcanzaría en un tiempo mucho más largo. En la ilustración 1 se representa cualitativamente el comportamiento del coeficiente de infiltración en riego continuo e intermitente.

Después de esta etapa de no riego, comienza un nuevo ciclo de intermitencia, permitiendo otra vez la

1. Variación del coeficiente de infiltración en riego continuo y en riego intermitente

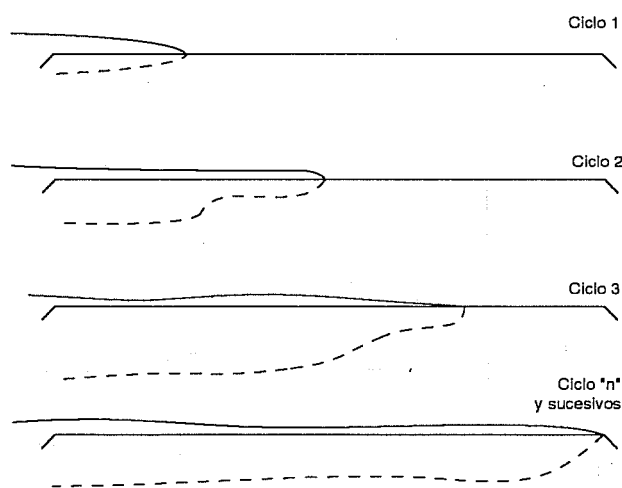


entrada de agua al surco. En dicho ciclo, debido a la modificación citada en la velocidad de infiltración, el agua recorre mucho más rápido la zona previamente humedecida, avanzando una longitud mayor en el mismo tiempo. Entonces se acorta drásticamente la duración de la nueva fase de avance (y se alcanza una longitud mayor del surco), incrementando por este solo hecho la eficiencia en el uso del agua. Más adelante se verá que el riego intermitente tiene también otras ventajas.

Al cabo de un tiempo, en el que se ha humedecido otra región del surco, se detiene la entrada de agua y se producen de nuevo los efectos ya citados. Estos ciclos de intermitencia se repiten hasta alcanzar el final de la melga, y aún después, para humedecer el suelo de manera uniforme. En la ilustración 2 se muestra una gráfica de avance del riego intermitente, que ejemplifica cualitativamente el fenómeno. Si el método de riego intermitente se aplica de modo correcto, puede disminuir en gran medida las pérdidas por escurrimiento superficial. Por otra parte, al igualar los tiempos de oportunidad, aumenta la uniformidad de infiltración —el perfil de humedad en el suelo es más parejo— lo que puede reducir potencialmente las pérdidas por percolación profunda.

La principal característica física del riego intermitente, que lo hace por completo distinto del riego continuo, es la brusca disminución en el coeficiente de infiltración. Ella reduce al mínimo, por sí sola, la duración de la fase de avance, lo cual a su vez, iguala los tiempos de oportunidad a lo largo del surco. Este efecto contribuye a uniformar la aplicación y disminuye las pérdidas por percolación profunda y por escurrimiento a los drenes.

2. Representación cualitativa de la fase de avance en riego intermitente



Estos mismos propósitos se persiguen en el riego continuo. Sin embargo, para algunos tipos de suelo, longitudes de surco y pendientes, es muy difícil reducir el tiempo de avance y mantener iguales tiempos de oportunidad a lo largo de la melga, de lo cual depende en gran medida la eficiencia.

Se desconocen con precisión las causas de la reducción en el coeficiente de infiltración que se registran en el riego intermitente; no obstante, pueden deberse al lavado de materiales finos, que tapan algunos de los poros del suelo, o bien al desarrollo de fuerzas de tensión superficial producidas cuando cesa el escurrimiento. Parece que ambos procesos contribuyen a lograr este efecto (Bishop *et al.*, 1981b; James y Larson, 1976; y Avila, 1985).

La reducción del coeficiente de infiltración dependerá del tipo de suelo. Se ha comprobado la efectividad del riego intermitente en suelos de textura media y finos. Se desconoce su funcionamiento en los muy finos que se agrietan al secarse, pero es muy probable que el riego de este tipo no mejore drásticamente la eficiencia en suelos que poseen bajos coeficientes de infiltración. Se ha observado también que los efectos del riego intermitente son menores en surcos compactados.

Por otra parte, en México, al contrario de los Estados Unidos, se utilizan longitudes cortas de surco, lo que ha suscitado algunas dudas (Zierold, 1987) sobre si es posible obtener los mismos incrementos en la eficiencia que los logrados en ese país. Al respecto, se debe considerar que la longitud del surco es sólo una de las variables que deben ser tomadas en cuenta. De hecho, por ejemplo, Coolidge *et al.* (1982), realizaron experimentos en surcos de apenas 100 m de longitud, y reportaron reducciones de 50% en el agua requerida para completar el avance.

Sin embargo, si además de que el surco es muy corto, tiene poca pendiente, o está en un suelo con baja infiltración, el incremento en la eficiencia con riego intermitente puede ser muy pequeño, y no justificar inversiones adicionales de consideración. También ocurre que algunos dispositivos automáticos para riego intermitente, que funcionan muy bien en surcos largos, no son eficientes en los cortos. Esto se debe a que han sido diseñados para disminuir automáticamente el gasto o la duración de los ciclos después de un cierto número de intermitencias, lo que sí tiene ventajas en surcos largos.

Se ha comprobado (Avila, 1985) que el riego intermitente incrementa la uniformidad en el perfil de humedad en el suelo, es decir, que la región humedecida al final del surco tiene prácticamente la

misma profundidad que al inicio. Esta uniformidad es muy difícil de lograr con el riego continuo.

Una característica de la mayor importancia de este tipo de riego, es la necesidad de contar con dispositivos automáticos que controlen el gasto de entrada, así como los periodos de corte y de reingreso del agua. Esto obedece a que no cabe esperar que los agricultores maniobren las compuertas, tomas o sifones durante cada ciclo.

En la actualidad, existen válvulas y otros dispositivos comerciales, cuyo funcionamiento está controlado por microcircuitos, alimentados con celdas solares que les permiten autonomía. Desafortunadamente, dichos dispositivos funcionan en sistemas presurizados y su costo es elevado. El diseño de dispositivos automáticos, de manejo sencillo y pocas posibilidades de falla, es esencial para el éxito del método de riego intermitente. Sin embargo, hasta ahora no existen dispositivos automáticos probados para sistemas por gravedad, aunque Manzanera (1985) ha sugerido el empleo de algunos elementos, como las compuertas basculantes.

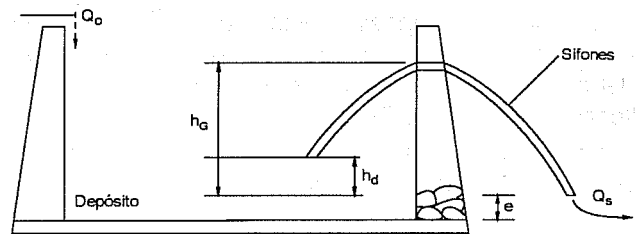
Descripción del dispositivo

Dada la importancia del riego intermitente para el uso eficiente del agua, y que en nuestro país muchas veces los agricultores no disponen de capacidad financiera ni técnica para emplear dispositivos electrónicos, en el IMTA se planteó desarrollar un sistema alternativo. Después de proponer y evaluar diversas opciones de diseño, se decidió utilizar un sistema sencillo, sin partes móviles y que no requiriera de energía adicional. El sistema propuesto está formado por un depósito, al que se añaden sifones de descarga, y que se ha denominado *diabeto* (de la raíz griega *diabetés*, que significa sifón) y que al parecer fue conocido por los griegos¹. Véase el depósito mostrado en la ilustración 3, con un sifón de descarga en el extremo derecho. En esta figura se anota la nomenclatura utilizada.

En el depósito, inicialmente vacío, se descarga un gasto constante Q_0 . Durante un cierto tiempo, el depósito se llena, sin que haya descarga por el sifón. Cuando el nivel en el depósito llega a la carga de cebado del sifón, éste inicia su descarga. Si está bien diseñado, su gasto de salida Q_s será bastante mayor que el de entrada, de manera que el nivel en el depósito disminuirá continuamente. Durante este tiempo, el gasto de salida se aplica al riego, y corresponde a la fase de entrada de agua a los surcos en un ciclo de intermitencia.

Finalmente, el nivel en el depósito disminuye hasta alcanzar el nivel de descebado del sifón; en

3. Esquema del diabeto. Nomenclatura



este momento se detiene la salida de agua y se inicia una nueva etapa de llenado del depósito, que corresponde a la "suspensión del riego" en cada de intermitencia. El ciclo se reinicia con el llenado del depósito. El que el diabeto funcione como se describe en los párrafos anteriores, depende de diversas variables: gasto de entrada, área y número de sifones, cargas de cebado y descebado y dimensiones del depósito.

Para obtener las reglas generales de diseño del diabeto es necesario conocer su superficie completa de respuesta, para lo cual lo más conveniente es integrar analíticamente las ecuaciones diferenciales que describen su funcionamiento, para después involucrar los criterios y características deseables del propio riego intermitente. Esto se logró como se describe a continuación.

Leyes de funcionamiento del diabeto

Para aquellos interesados en conocerlas en detalle, a continuación se muestra la derivación de las ecuaciones de funcionamiento del diabeto. Si se desea, puede también pasarse directamente al apartado *Ecuaciones generales de diseño* de este artículo.

Durante el tiempo en que el sifón no descarga, el volumen almacenado en el depósito cambia respecto al tiempo simplemente como,

$$\frac{dV}{dt} = Q_0 \quad (1)$$

Donde Q_0 es el gasto de entrada, V el volumen y t el tiempo.

Lo que interesa conocer es la variación del tirante en el depósito, así como el tiempo que tarda en llenarse. El volumen puede expresarse como

$$V = A_d h \quad (2)$$

Donde A_d es el área en planta del depósito, y h el tirante. La forma en planta del depósito puede ser cualquiera, lo que es útil para ubicarlo en el campo.

Interesa averiguar el tiempo que transcurre para que la carga h se incremente desde la carga de descebado h_d (depósito vacío) hasta la de cebado h_c (carga máxima), en que se inicia la descarga del sifón. A este lapso se le denominará tiempo de llenado del depósito T_l .

Con estas consideraciones y sustituyendo la ecuación (2) en la (1), se obtiene

$$\int_0^{T_l} dt = \frac{A_d}{Q_0} \int_{h_d}^{h_c} dh \quad (3)$$

Integrando, el tiempo de llenado resulta ser simplemente:

$$T_l = \frac{A_d(h_c - h_d)}{Q_0} \quad (4)$$

Ahora, debe obtenerse el tiempo de vaciado del depósito, es decir, el tiempo transcurrido desde que el sifón inicia su funcionamiento hasta que, bajando el nivel, se alcanza el tirante de descebado. Calcular este tiempo ya no resulta tan sencillo.

La ecuación de la variación del volumen almacenado en el depósito cuando funciona el sifón es la siguiente:

$$\frac{dV}{dt} = Q_0 - Q_s \quad (5)$$

Donde Q_s es el gasto de salida, definido por la ecuación

$$Q_s = m\mu A\sqrt{2gh} \quad (6)$$

en la cual m es el número de sifones del diabeto, μ , su coeficiente de descarga, A su área transversal y g la aceleración de la gravedad.

El coeficiente de descarga para sifones pequeños puede considerarse constante e igual a 0.6, de acuerdo con la FAO (Kraatz y Mahajan, 1975).

Al sustituir la expresión (6) en la (5), y considerar la ecuación (2), que expresa el volumen del depósito en función de su área y de la carga, se obtiene:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Q_0}{A_d} = \frac{m\mu A\sqrt{2gh}}{A_d} \quad (7)$$

Para llegar a una solución general, en primer término se definen las variables adimensionales siguientes:

$$\text{tiempo adimensional } t^* = \frac{t}{T_l} \quad (8)$$

$$\text{carga adimensional } h^* = \frac{h}{h_c} \quad (9)$$

Multiplicando y dividiendo la derivada de h , por h_c y T_l no se altera, así

$$\frac{dh}{dt} = \frac{h_c}{T_l} \frac{d(h/h_c)}{d(t/T_l)} = \frac{h_c}{T_l} \frac{dh^*}{dt^*} \quad (10)$$

si se sustituye el valor de T_l calculado con la ecuación (4) la derivada de h respecto al tiempo se puede escribir:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Q_0 h_c}{A_d H_t} \frac{dh^*}{dt^*} \quad (11)$$

donde

$$H_t = h_c - h_d \quad (11.1)$$

Sustituyendo esta expresión en la ecuación (7), que describe la variación de la carga en el diabeto y haciendo operaciones, se obtiene

$$\frac{dh^*}{dt^*} = \frac{H_t}{h_c} - \frac{m\mu A\sqrt{2gh_c}}{Q_0} \frac{H_t}{h_c} h^{*1/2} \quad (12)$$

si se definen las constantes adimensionales

$$h_w = \frac{H_t}{h_c} = \frac{h_c - h_d}{h_c} = 1 - \frac{h_d}{h_c} \quad (13)$$

$$Q^* = \frac{m\mu A\sqrt{2gh_c}}{Q_0} \quad (14)$$

y se sustituyen en la ecuación (12) resulta

$$\frac{dh^*}{dt^*} = h_w [1 - Q^* h^{*1/2}] \quad (15)$$

con lo que finalmente se obtiene una expresión sencilla para la variación de la carga adimensional en el diabeto.

Lo que interesa conocer es el tiempo que tarda en vaciarse el depósito, al que se denominará "tiempo de vaciado" (t_v), y que corresponde a un cambio de nivel, desde la carga de cebado hasta la de descebado.

Los límites de integración serían entonces:

Para el tiempo desde $t_0 = 0$ hasta t_v

Para la carga desde $h_0 = h_c$ hasta h_d

Correspondientemente, los límites de integración en la ecuación diferencial adimensional serán:

Para el tiempo adimensional

$$\text{desde } t_0^* = \frac{t_0}{t_e} = 0 \quad (16)$$

$$\text{hasta } t_v^* = \frac{t_v}{T_i} \quad (17)$$

Para la carga adimensional

$$\text{desde } h_0^* = \frac{h_0}{h_0} = 1 \quad (18)$$

$$\text{hasta } h_f^* = \frac{h_d}{h_0} \quad (19)$$

La ecuación (19) se puede escribir, considerando estos límites de integración como:

$$\int_0^{t_v^*} dt^* = \int_1^{h_f^*} \frac{dh^*}{1 - Q^* h^{*1/2}} \quad (20)$$

Omitiendo, por razones de espacio, el proceso de integración, la solución de esta ecuación resulta ser

$$t_v^* = -\frac{2}{h_w Q^{*2}} \left\{ Q^* (h_f^{*1/2} - 1) + \text{Ln} \left[\frac{1 - Q^* h_f^{*1/2}}{1 - Q^*} \right] \right\} \quad (21)$$

Por otra parte, por la ecuación (16)

$$h_w = 1 - \frac{h_d}{h_c} = 1 - h_f^* \quad (22)$$

Por lo que la ecuación (21) queda, finalmente:

$$t_v^* = -\frac{2}{(1 - h_f^*) Q^{*2}} \left\{ Q^* (h_f^{*1/2} - 1) + \text{Ln} \left[\frac{1 - Q^* h_f^{*1/2}}{1 - Q^*} \right] \right\} \quad (23)$$

En esta ecuación se encuentra descrito el comportamiento de cualquier diabeto, puesto que se ha integrado la ecuación diferencial adimensional que los gobierna.

Se puede ver que el tiempo de vaciado adimensional t_v^* depende de los parámetros adimensionales h_f^* y Q^* .

Podría ocurrir una falla del diabeto si cuando descarga el sifón se alcanzara una condición de equilibrio entre el gasto de entrada y el de salida,

de tal manera que, siendo iguales, se mantuviera un nivel constante en el depósito. Con ello el diabeto perdería sus propiedades de intermitencia. Entonces, para que ésta exista, debe garantizarse que una vez que el sifón esté en funcionamiento, el nivel en el depósito siempre descienda. Dicho de otro modo, la variación del tirante respecto al tiempo siempre debe ser negativa, lo que en términos matemáticos se expresa:

$$\frac{dh}{dt} < 0 \quad (24)$$

la cual puede transformarse en la condición adimensional de intermitencia.

$$h_f^* > \frac{1}{Q^{*2}} \quad (25)$$

Si se introduce un factor de seguridad de 20%, la desigualdad de la ecuación (25) cambia a la siguiente igualdad:

$$h_f^* = \frac{1.2}{Q^{*2}} \quad (26)$$

Introduciendo esta condición en la ecuación (23), se simplifica a la siguiente:

$$t_v^* = \frac{-2}{Q^{*2} - 1.2} \left\{ 1.0954 - Q^* + \text{Ln} \left[\frac{-0.0954}{1 - Q^*} \right] \right\} \quad (27)$$

El tiempo de vaciado adimensional es función ya solamente del parámetro adimensional Q^* .

Por otra parte, para el riego intermitente se recomiendan razones de ciclo iguales a uno; es decir, que el tiempo de llenado sea igual al de vaciado. Matemáticamente:

$$t_v^* = 1 \quad (28)$$

al cual corresponde, conforme a la ecuación (27), un valor de Q^* de

$$Q^* = 3.6 \quad (29)$$

El problema de obtener reglas de diseño ha quedado reducido al cumplimiento de las ecuaciones (26), (28) y (29), que son ya ecuaciones algebraicas simples.

Ecuaciones generales de diseño

Con las ecuaciones de funcionamiento del diabeto pueden plantearse varios procedimientos de diseño, en función de los datos disponibles. Lo más común será cuando se conocen el tiempo de vaciado (tiempo de riego en cada intermitencia), el gasto para alimentar al diabeto y la carga hidráulica disponible, en cuyo caso puede emplearse el siguiente procedimiento:

1. Calcular la carga de descebado, con la ecuación:

$$h_d = 0.093 h_c$$

2. Calcular el área de los m sifones por utilizar, con la ecuación:

$$A = \frac{3.6 Q_0}{m \mu \sqrt{2 g h_c}}$$

3. Calcular el área en planta del depósito con la ecuación:

$$A_d = \frac{t_v Q_0}{(h_c - h_d)}$$

y definir su geometría, conforme su ubicación en el campo, según convenga (se recomienda de sección cuadrada o rectangular).

4. Calcular el número de surcos por regar con la ecuación:

$$N = 2 Q_0 / q_i$$

siendo q_i el gasto requerido en cada surco.

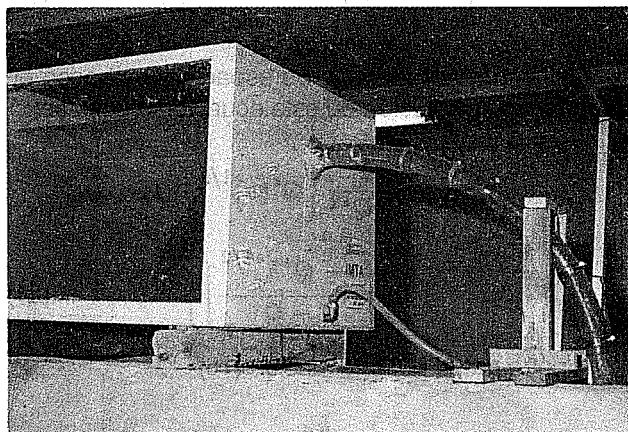
Como en cualquier procedimiento de diseño, frecuentemente será necesario hacer ajustes para adecuarse a las dimensiones y condiciones existentes en el campo. Por ejemplo, se debe ajustar el número de sifones conforme a los diámetros de tubo comerciales disponibles. Este procedimiento es general, pero conviene aplicar las recomendaciones de diseño que se dan más adelante, y que son el fruto de las experiencias obtenidas en pruebas de laboratorio y campo.

Comprobación en laboratorio

Para comprobar experimentalmente la validez de las ecuaciones de funcionamiento del dispositivo, así como su procedimiento de diseño, se cons-

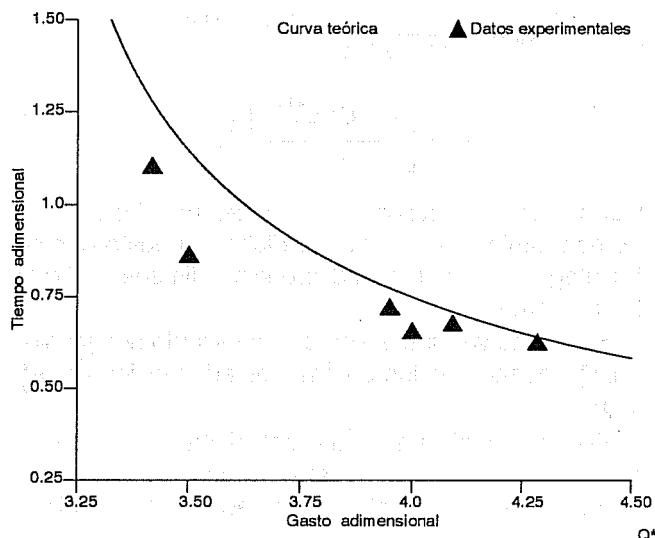
truyó en el laboratorio un pequeño diabeto, consistente en un depósito de planta cuadrada de 74 cm de lado y con un sifón de 2" de diámetro, al que se alimentó con un gasto de 0.8 l/s. En la ilustración 4 se muestra el diabeto de prueba en el laboratorio de medición, certificación y uso eficiente del agua del IMTA.

Al variar la longitud del sifón, se consiguió el mismo efecto que si se tuvieran en prueba varios dialetos. Ello equivale a probar diferentes combinaciones de los parámetros adimensionales de diseño. En la ilustración 5 se presentan los resultados medidos adimensionalmente, en contraste con los calculados mediante las ecuaciones de diseño. Como puede observarse, el ajuste obtenido entre los experimentos y la teoría es muy bueno. Las diferencias observadas se deben a que al principio de la descarga del tubo del sifón, éste funciona durante un corto tiempo como un vertedor, lo que no se



4. Diabeto en prueba en el laboratorio de medición

5. Resultados de comprobación en el laboratorio de funcionamiento del diabeto



considera en las ecuaciones, en las que el cebado se asume como instantáneo.

Validación en el campo

Para proceder a la validación del diabeto en el campo, se unieron esfuerzos por parte del IMTA y de la Facultad de Ingeniería de la UAZ, que se interesa en promover el uso del sistema de riego intermitente en la agricultura del estado, caracterizado por ser semiárido, con abastecimiento por medio de pozos profundos.

Para probar el riego intermitente, se seleccionó una parcela ubicada en el campo experimental de la Facultad de Agronomía de dicha universidad. Dadas las dimensiones de la parcela y el gasto de ingreso disponible, se diseñó un prototipo de diabeto. En la ilustración 6 se presenta un croquis con el arreglo y ubicación del diabeto, así como las dimensiones de la parcela de prueba.

El gasto disponible, relativamente pequeño, fue de:

$$Q_0 = 12 \text{ l/s}$$

El tiempo de vaciado y la carga disponible fueron:

$$-t_v = 22 \text{ min} = 1320 \text{ s (Propuesto)}$$

$$h_c = 1.0 \text{ m (Propuesto)}$$

Siguiendo el procedimiento de diseño antes descrito, se obtienen los siguientes resultados:

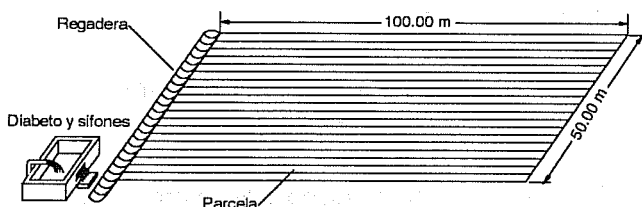
1. Carga de descebado

$$h_d = 0.092 h_c = 0.092 (1.0) = 0.092 \text{ m}$$

2. Área de los sifones

$$A = \frac{3.6Q_0}{m\mu\sqrt{2gh_c}} = \frac{3.6 \times 0.012}{m(0.6)\sqrt{19.62 \times 1.0}} = \frac{0.01625}{m}$$

6. Parcela de prueba y localización del diabeto. Pruebas en Zacatecas



Esta ecuación indica que se requiere de un área total de 0.01625 m², que puede ser repartida en "m" sifones. Los cálculos para determinar los diámetros posibles, en función del número de sifones, se indican en el cuadro 1.

Por disponibilidad comercial de diámetros, sólo tres opciones son posibles: colocar dos sifones de 4", cinco de 2.5" u ocho de 2 pulgadas.

3. Cálculo del área del depósito.

$$A_d = \frac{t_v Q_0}{(h_c - h_d)} = \frac{1320(0.012)}{1.0 - 0.09} = 17.406 \text{ m}^2$$

Se eligió un depósito cuadrado de 4.15 m por lado.

El diabeto desarrollado tiene una capacidad de regar aproximadamente una superficie total de 4 ha. Su validación y puesta en operación consistió en verificar que funcionara correctamente y en medir los siguientes aspectos, previstos en el diseño:

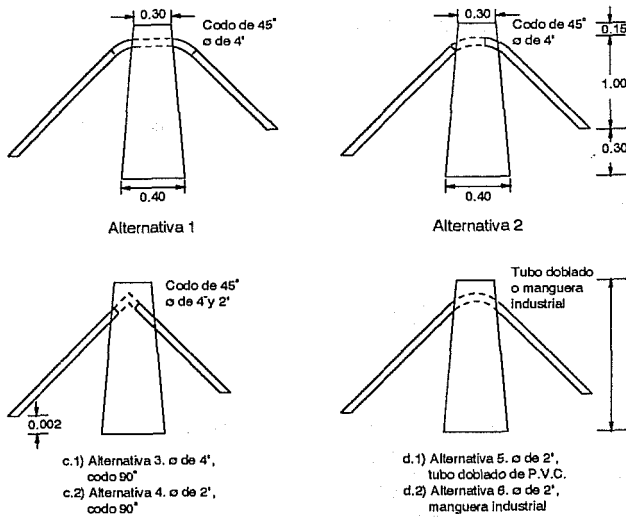
- Cebado de los sifones
- Descebado de los sifones
- Tiempo de vaciado
- Tiempo de llenado

Para probar el funcionamiento del diabeto, se ensayaron varias combinaciones de diámetros, materiales y geometrías de los sifones (se puede ver en detalle en Martínez-Austria y Barrios, 1990). También se probaron diversas opciones de construcción de los sifones: se utilizaron tuberías flexibles y de PVC con codos y uniones, como se muestra en la ilustración 7. Se observó que con tubos rígidos, utilizando codos o con doblado a calor, no se lograba un buen funcionamiento de los sifones. En la mayoría de los casos no se obtuvo el cebado de todos, ya que funcionan hidráulicamente como tubos cortos, o bien sólo se cebaron algunos, con lo que tampoco funcionó bien el diabeto, pero sí lo hizo cuando se utilizaron tubos flexibles, que describen

1. Diámetros posibles de sifones

Sifones m	área/sifón A = 0.01625/m	Diámetros	
		$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$ (m)	D (pulg)
1	0.01625	0.1438	5.66"
2	0.008125	0.10171	4.00" (Alt. 1)
3	0.005417	0.08304	3.26"
4	0.004062	0.07192	2.83"
5	0.00325	0.0643	2.53" (Alt. 2)
6	0.00271	0.05872	2.31"
7	0.00232	0.05436	2.14"
8	0.00203	0.0508	2.00" (Alt. 3)

7. Opciones probadas de construcción de sifones



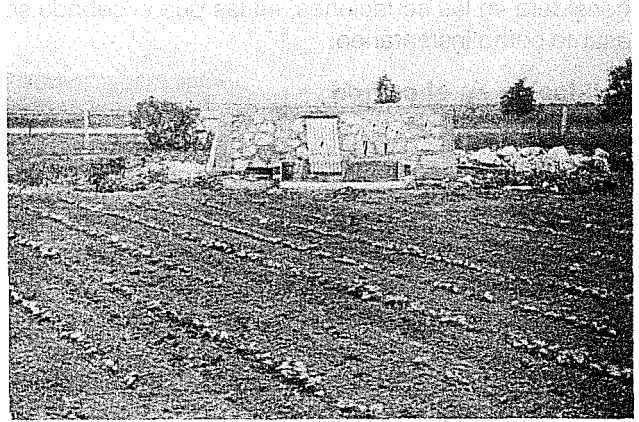
una curva suave al doblarse, lo que favorece el cebado.

Se probaron varios diámetros, y se concluyó que la mejor combinación es usar como sifones tubos de manguera flexible de 2" de diámetro. Esta combinación será la recomendable en general.

Las dimensiones de tubería escogidas hacen que el cebado se produzca de manera sencilla. Asimismo, se obtiene una batería de sifones que, por su número, hace muy versátil el funcionamiento del diabeto. Así, por ejemplo, si por alguna causa se dispone de menor gasto de ingreso que el previsto, bastará con tapar alguno de los sifones y se tendrá un buen funcionamiento del dispositivo.

Un aspecto que debe cuidarse es que los sifones estén bien nivelados, para que el agua los alcance al mismo tiempo, y se produzca el cebado simultáneo de todos ellos. Antes de colocarlos, se deben lavar por dentro con detergente, para que no contengan grasa que, por efectos de capilaridad, dificulte el cebado. Con estos criterios, el cebado de los sifones (ocho) del diabeto funcionó perfectamente. En la ilustración 8 se muestra el dispositivo construido en Zacatecas. Obsérvese la batería de sifones de descarga.

Por otra parte, durante el descenso del nivel en el diabeto, una vez que los sifones están descargando agua a los cultivos, cuando el nivel está a unos pocos centímetros arriba de su entrada, se produce la formación de pequeños vórtices alternantes —es decir, que se forman y desaparecen alternadamente— y que introducen aire de manera desigual a los sifones, descebandos sólo algunos de ellos y evitando el descebado simultáneo de todos. Para eliminar este problema se probaron varias técnicas, dos de las



8. Diabeto en el campo (Zacatecas)

cuales resultaron efectivas. La primera consiste en perforar un pequeño orificio en cada sifón, de 0.5 cm de diámetro, 5 cm arriba de la entrada, que permite el ingreso de aire y con ello el descebado en tiempos iguales.

El segundo procedimiento, más efectivo, consiste en interconectar los sifones con un tubo de cobre delgado —del que se usa en las instalaciones de gas— de 1/4". De esta manera, cuando el aire entra a alguno de los sifones, se comunica a todos, y se desceban de inmediato, al mismo tiempo. Sólo debe tenerse cuidado de sellar bien los tubos de cobre, para que no entre aire en los puntos de unión con la manguera de plástico.

Con las recomendaciones de diseño y funcionamiento anteriores, se logró un óptimo funcionamiento del diabeto. Se regaron 1.5 ha sembradas de frijol. En la ilustración 9 se observa una panorámica del campo de cultivo, y en la 10, el momento en que se inicia la descarga durante uno de los ciclos de riego. Actualmente, a raíz del interés despertado en la región, se instalan las primeras parcelas productivas en Fresnillo, Zacatecas.

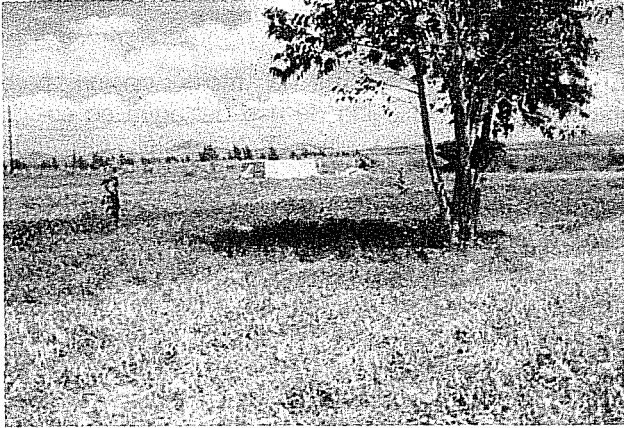
Recomendaciones y procedimiento de diseño

Considerando tanto la solución matemática del problema como la experiencia obtenida con el funcionamiento del diabeto en el laboratorio y el campo, se recomienda el siguiente procedimiento de diseño y puesta en operación.

Sean los siguientes datos:

- Gasto disponible para el riego: Q_0 (en m^3/s)
- Carga o desnivel disponible: H (en m)

Si el desnivel o carga disponible es grande (mayor



9. Panorámica del campo de cultivo en Zacatecas, regado con el diabeto

de 1.5 m), se recomienda dar al diabeto una altura total H entre 1 y 1.2 metros.

- Tiempo requerido de avance en cada ciclo: t_v (en segundos)

Si se desconoce el tiempo requerido de avance (t_v), puede determinarse de la siguiente manera:

- Se toma un surco o melga cualquiera del terreno por regar.
- Se procede al riego como si se tratara del riego continuo común, dejando que el agua alcance el final de la parcela.
- Cuando el agua llegue al final de la parcela, se detiene el riego y se espera que el surco o melga se seque, dejando transcurrir después, por lo menos, 20 minutos.
- Se inicia un nuevo riego, sobre el surco mojado, midiendo cuidadosamente el tiempo que ahora

tarda el agua en llegar hasta el final de la parcela. Este tiempo será, con muy buena aproximación, el dato requerido t_v .

Se procede al diseño del diabeto como sigue:

1. A la altura H se le restan 5 cm para el bordo libre y alojar los sifones, y 3 cm más para que tengan descarga libre a la salida (ver la dimensión "e" en la ilustración 3). La carga de cebado será entonces

$$h_c = H - 0.08$$

2. La carga de descebado será ²:

$$h_d = 0.12h_c$$

3. Se utilizarán sifones de manguera flexible de 2". El número de ellos será:

$$m = \frac{3.6Q_0}{\mu A \sqrt{2gh_c}}$$

Algunas veces, las menos, el gasto disponible Q_0 será grande, y se podrá diseñar un diabeto muy grande. En este caso se recomienda limitar al dispositivo para regar un área máxima simultánea de menos de 1 ha. Conviene que el gasto Q_0 por utilizar sea pequeño.

Usualmente, el valor de m obtenido de la ecuación anterior no será entero; deberá ajustarse al entero inmediato superior (por ejemplo, si m resulta 6.3, se pondrán 7 sifones). Por lo general, los errores introducidos por ajustar a un número entero de sifones no serán de consideración, sólo se reflejarán en ciclos de vaciado un poco más cortos.

4. Se calcula el área en planta del depósito:

$$A_d = \frac{t_v Q_0}{(h_c - h_d)}$$

Si la carga disponible es pequeña (menor de 60 cm) y se desea aplicar un gasto Q_0 mediano o grande simultáneamente, el área en planta del diabeto puede resultar muy grande. En este caso se recomienda regar una superficie menor al mismo tiempo, o bien aumentar la carga disponible (H) con una bomba.

5. El número de surcos por regar simultáneamente se calcula como

$$N = 2Q_0/q_i$$



10. Descarga del diabeto a la regadera durante un riego. (El gasto de salida es mayor que el de entrada)

siendo q_i el gasto utilizado en cada surco.

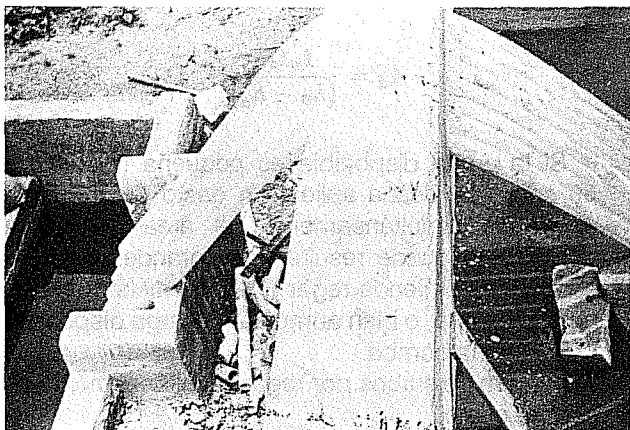
Materiales y costos de construcción

Los materiales de construcción variarán según los disponibles en la región. Se recomienda construir las paredes de mampostería, con un acabado rugoso de mortero en el interior. La zona donde se alojen los sifones se construirá de mortero, para permitir una buena nivelación y evitar que se aplasten.

La batería de sifones será de tubos de manguera flexible, colocados con cuidado en la nivelación y verificando que no se aplasten o deformen en lo más mínimo. Deben fijarse la entrada y salida de los sifones para asegurar que cumplan con las especificaciones del diseño. Se recomienda utilizar un murito de ladrillo y cemento (véase la ilustración 11). El fondo puede construirse simplemente de tierra bien compactada, aunque sería recomendable construir un firme de concreto delgado, sin refuerzo, sólo para evitar fugas.

La descarga de los sifones será directamente a la regadera, como se indica en la ilustración 5. En el sitio de la descarga se sugiere una protección como la que se observa en la ilustración 8. El agua se repartirá a la regadera, y de ésta a los surcos de manera directa. No se pueden usar sifones de la regadera al surco, porque se descebarían cada ciclo.

El costo de un diabeto con paredes de mampostería, un firme de concreto en el fondo, y apegado a las recomendaciones anteriores, será de alrededor de 2.3 millones de pesos; considerando que se debería dominar una superficie de riego de 3 a 4 ha por diabeto, el costo por hectárea será del orden de 650 000 pesos.



11. Detalle de fijación de los sifones a la entrada, por medio de un murito de ladrillos y mortero

Conclusiones y recomendaciones

El riego intermitente es la mejor opción para incrementar la eficiencia de uso del agua en suelos con valores medios y altos de infiltración, utilizando el riego por gravedad. Su aplicación práctica, sin embargo, requiere de sistemas automáticos de intermitencia.

El diabeto ha sido diseñado para operar en las condiciones típicas de los sistemas de riego de México. Ha sido conceptualizado para funcionar en surcos cortos. Por su sencillez, los agricultores entienden rápidamente su funcionamiento, y pueden ajustarlo a sus condiciones específicas. Ellos mismos pueden manipularlo y darle mantenimiento.

Con base en las experiencias de laboratorio y campo, se han obtenido criterios y recomendaciones de diseño y operación, que hacen confiable su funcionamiento en el campo.

¹ En el *Diccionario Enciclopédico Salvat* se registra el término Diabeto, aclarando que se trata de un dispositivo utilizado por los griegos para producir descargas intermitentes, y formado por un depósito y un sifón.

² Se ha introducido un factor mayor a las ecuaciones generales de diseño para asegurar el buen funcionamiento del descebedo.

Nota

Para cualquier información adicional, los interesados pueden dirigirse al Dr. Martínez Austria, al IMTA.

Referencias

- Avila Miranda F. E. "Investigación bibliográfica sobre la aplicación intermitente del agua al sistema de riego superficial por surcos", trabajo de titulación, Universidad de Chapingo, México, 1985.
- Bishop, A. A., Walker, W. R. y Keller J. "Surge flow furrow irrigation", *Water Forum* '81, EUA, 1981.
- Bishop, A. A., Walker, W. R., Allen, N. L. y Poole, G. J. "Furrow advance rates under surge flow systems", *Journal of Irrigation and Drainage Div. ASCE*, vol. 107, No. IR3, 1981 b.
- Coolidge, P. S. Walker, W. R. y Bishop A. A. "Advance and run-off-surge flow furrow irrigation", *Journal of Irrigation and Drainage Div. ASCE*, vol. 108, No. IR1, 1982.
- James, L. G. y Larson C. L. "Modeling infiltration and redistribution of soil water during intermittent application", *Transactions of ASCE*, 1976.
- Karmeli, D. y Peri G. "Pulse irrigation—design for operating sets", *Journal of Irrigation and Drainage Div. ASCE*, vol. 103, No. IR1, 1977.
- Kraatz, D. B. y Mahajan I. K. "Small Hydraulic Structures", *FAO Irrigation and Drainage Paper 26/2*, Roma, 1975.
- Levin, I. y Van Rooyen C. "Soil water flow and distribution in horizontal and vertical directions as influenced by intermittent water application", *Soil Science*, vol. 124, No. 6, 1977.

- Manzanera, M. *Contribución al eficiente uso del agua en sistemas de riego por gravedad y a cielo abierto mediante dos nuevas técnicas: automatismos en obras de distribución, derivación y aplicación de caudales sin utilización de energía externa, e irrigación por ondas de caudal*, Instituto Nacional de Ciencia y Técnica Hídricas, Mendoza, Argentina, 1985.
- Martínez, Austria, P. y Aldama, R. A. *Dispositivo fluídico para riego intermitente*, Serie divulgación, IMTA, 1990.
- Martínez, Austria P. y Barrios Domínguez, N. "Validación en laboratorio y en campo de un dispositivo fluídico para riego intermitente", XI Congreso Nacional de Hidráulica, AMH, Zacatecas, octubre de 1990.
- Samani, Z. A., Walker W. R. y Willardson L. S. "Infiltration under surge flow irrigation", *Journal ASCE*, vol. 28, No. 5, 1985.
- Schmitz, G. H. y Seus G. J. "Analytical solution of simplified surge flow equations", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, vol. 113, noviembre, 1987.
- Stringham, G. E. y Keller J. "Surge flow for automatic irrigation", *ASCE Irrigation and Drainage Speciality Conference*, Albuquerque N. México, 1979.
- Zierold, Reyes L. "Informe de la visita a las unidades de riego en Montemorelos y General Terán, N. L. ", Informe de la SIH de la SARH, 13 marzo 1987.
- Zur, B. "The pulsed irrigation principle for controlled soil wetting", *Soil Science*, vol. 122, 1976.