

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

<i>Título</i>	Riego intermitente.
<i>Autor / Adscripción</i>	Nahun Harned García Villanueva Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
<i>Publicación</i>	Ingeniería Hidráulica en México, (2): 71-87
<i>Fecha de publicación</i>	1991
<i>Resumen</i>	El agua dulce que se consume para fines de riego es aproximadamente un 90% del total disponible, de aquí que en el sector agrario sea esencial reducir los consumos unitarios, usando técnicas que optimicen la eficiencia de aplicación del riego a los cultivos. En este trabajo se presentan la descripción física del riego intermitente, su modelación matemática, el desarrollo de un esquema numérico en su simulación y algunos criterios prácticos para su diseño.
<i>Identificador</i>	http://hdl.handle.net/123456789/1262

Riego intermitente

Nahun Hamed García Villanueva

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, CNA

El agua dulce que se consume para fines de riego es aproximadamente un 90% del total disponible, de aquí que en el sector agrario sea esencial reducir los consumos unitarios, usando técnicas que optimicen la eficiencia de aplicación del riego a los cultivos. El método por intermitencias, aplicado en sistemas de riego por gravedad desde los inicios de la década de los 80, ha demostrado ser una opción adecuada, en factibilidad técnica y económica, por medio de la cual es posible, en ciertos casos, alcanzar un uso eficiente del agua superior al de los métodos tradicionales. En este trabajo se presentan la descripción física del riego intermitente, su modelación matemática, el desarrollo de un esquema numérico en su simulación y algunos criterios prácticos para su diseño.

Características generales del riego intermitente

Antecedentes

Desde fines de la década de los 70, en zonas semiáridas de EUA (Texas, California, etc.), se han realizado pruebas que han puesto de manifiesto, tanto en el nivel de parcelas experimentales como en el de las áreas de producción, las ventajas del riego intermitente, frente a los métodos convencionales de descarga continua en sistemas de riego por gravedad.

Stringham y Keller, en 1979, introdujeron el concepto de *Surge flow* en la Conferencia sobre especialidades en irrigación y drenaje de la American Society of Civil Engineers. En marzo de 1986, la Oficina de Patentes de EUA registró esta modalidad de riego como un método y sistema por surcos, y otorgó la patente a los doctores Jack Keller y G. E. Stringham, en tanto que la Fundación de la Universidad del Estado de Utah quedó como cesionaria o apoderada.

Desde entonces las técnicas se han experimentado de manera continua en varios centros de universidades privadas y estatales de California y Texas, así como en las de Kansas, Utah y Colorado, entre otras.

La investigación sobre el novedoso método de riego se ha abordado tanto en parcelas ex-

perimentales como desde el punto de vista teórico. Con respecto a la investigación de campo, los principales avances y aportaciones se han obtenido en las universidades mencionadas.

En lo referente a la investigación teórica, los esfuerzos se han encaminado hacia la comprensión física, la representación matemática y la simulación numérica del fenómeno. Algunas de las principales aportaciones han sido hechas por Atchinson (1973), Bassett (1972), Clemmens (1978), Bishop (1981), Blair (1988), Edwin (1988), Elliot y Walker (1982), Katopodes y Strelkoff (1977), Keller (1979), Schmitz (1987), Sherman (1982), Singh (1987), Stringham (1979) y Wallender (1986), entre otros investigadores; no obstante el acervo bibliográfico que existe sobre el tema, la mayoría de los avances respecto a la simulación numérica está relacionada con la primera fase del riego, o sea, con el proceso de avance del frente de onda durante el primer impulso y es poco lo que existe para la simulación de la etapa de recesión y menos aún en lo que se refiere a los impulsos posteriores.

De acuerdo con lo anterior, y a pesar de que en la actualidad dicha metodología de riego ya se ha difundido por todo el mundo, es importante indicar que los criterios para su diseño, sus rangos de aplicación práctica, así como sus ventajas y desventajas respecto a otros métodos de riego, aún no están bien definidos.

En diversas instituciones educativas y gubernamentales de México y otros países iberoamericanos, como Brasil y España, se están realizando grandes esfuerzos, tanto en la investigación básica como en la experimental, para establecer criterios generales que permitan la implementación y adecuación prácticas de este método de riego. Este trabajo, que se inició en 1987, es el resultado de un proyecto de investigación patrocinado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA); en él han participado directa e indirectamente varios de sus especialistas.

Descripción del riego por impulsos

El riego por impulsos se basa en un sistema de descargas intermitentes, las cuales son controladas por un dispositivo que administra y suministra el agua a la parcela. Normalmente, dicho dispositivo de control es una válvula automatizada que se adapta al hidrante de un sistema de tubería con compuertas. Su fuente de alimentación es mediante bombeo a baja presión. El sistema está diseñado para suministrar descargas de agua en forma cíclica o intermitente a un lado y otro de la válvula, atendiendo dos grupos de surcos; el agua escurre en cada uno de ellos alternadamente, durante intervalos de tiempo fijados con anterioridad, que dependen del avance y recesión del frente de onda (véase ilustración 1).

Para el riego suministrado en forma continua, un regador es capaz de manejar una unidad de riego con un grupo de n surcos. Con la instalación de la válvula, podrá atender por impulsos dos unidades, cada una con un grupo de n surcos, que recibirán el agua de manera alternada y por un tiempo determinado.

En el riego intermitente, el flujo alcanza el final de los surcos después de varios ciclos en ambos lados de la válvula. Cuando el frente de onda llega al final no se da por concluido el riego, ya que las descargas intermitentes deben continuarse hasta que en toda la longitud de los surcos se haya infiltrado la lámina de riego.

1. Sistema de alimentación por medio de válvula

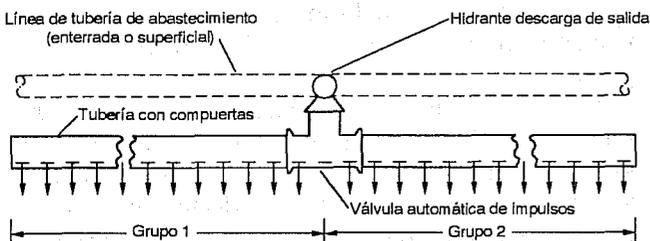


Diagrama de una división en grupos o series de tuberías con compuertas utilizadas para riego por impulsos

La superficie que puede ser atendida por una sola válvula depende de:

- El volumen disponible en un mismo hidrante o fuente de abastecimiento.
- La frecuencia de los riegos que necesite el cultivo, en función de la textura del suelo, su estado de humedad y las necesidades intrínsecas de la planta.
- El número de cambios posibles que admita la válvula en función del calendario de riego.

La válvula tiene la posibilidad de adecuarse a terrenos de diferente topografía, sin más que variar el número de compuertas operativas en la tubería y su disponibilidad a ambos lados.

En general, en surcos con longitudes menores a los 400 m conviene utilizar tiempos fijos de apertura y cierre, es decir, ciclos constantes durante el riego. En aquéllos con longitudes superiores a la señalada, se justifica establecer una política de variación en la duración de los tiempos de apertura y cierre, por la necesidad operativa de suministrar el agua de manera que el frente de onda alcance su extremo final en el menor tiempo posible. Mientras no se haya alcanzado éste, los tiempos de los nuevos ciclos se incrementan. Posteriormente, una vez que se ha llegado al final, deberá reducirse su duración. Con estas políticas se logran controlar de manera más efectiva tanto las pérdidas por escurrimientos fuera de los surcos como aquéllas por percolación profunda a lo largo de los mismos.

En el riego intermitente, de acuerdo con la experiencia de varios investigadores (Walker, Stringham, Keller, etc.), se ha encontrado que en surcos con longitudes equivalentes a dos veces a las normalmente recomendadas para la implementación del riego continuo, el frente de onda alcanza el final de ambas unidades casi al mismo tiempo que cuando se proporciona el caudal en forma continua y en una sola unidad.

Procesos físicos del riego por impulsos

Poco tiempo después de suspender el suministro de caudal en un surco, se origina una onda de recesión que lo barre aguas abajo hasta alcanzar el frente de onda. Una vez que aquélla ha llegado a una cierta región y durante el intervalo que tarda en volver a ser mojada por la onda de avance del próximo ciclo, en dicha sección se produce una serie de transformaciones físico-químicas. La estructura del suelo se altera, los terrones se disuelven parcialmente, las partículas se acomodan y

forman una sedimentación que origina el aislamiento de la superficie. Aunque el flujo se suspenda y, en consecuencia, también la infiltración superficial, las partículas de arcilla contenidas en el suelo humedecido continúan con su proceso de expansión; tanto el agua como el suelo en contacto con la atmósfera captan aire por atracción capilar y bloquean las pequeñas superficies de los poros del suelo. El proceso se repite en cada ciclo durante el tiempo de desagüe y, por tanto, durante los siguientes suministros de agua se van reduciendo la infiltración y la resistencia al cortante o rugosidad de la superficie del suelo, con lo que el flujo circula con más rapidez y se consigue un avance mayor y una mejor uniformidad en el riego.

La clave para que se verifiquen dichos cambios, producto de la interacción agua-suelo, está en la selección de una política adecuada de operación de las descargas intermitentes que controla la válvula, especialmente en lo que se refiere a la fijación del tiempo de cada ciclo. La duración de los ciclos depende de:

- La rapidez y homogeneidad del avance del agua por los surcos.
- La uniformidad de infiltración del agua en el suelo.
- El control de la escorrentía en el último tramo de los surcos.
- La reducción adecuada de la infiltración y la velocidad con que se produce.

En contraste con el riego intermitente, cuando la aportación de agua a surcos con longitudes superiores a las recomendadas para riego continuo no se interrumpe sino hasta el final de los mismos (cuando la descarga es continua en vez de intermitente), llega un momento en que el avance del frente de onda, aunque continuo, se produce en forma lenta. Si el riego se da bajo estas condiciones, es de esperarse que en los primeros tramos del surco se produzcan grandes pérdidas por percolación profunda, esto es, que un alto porcentaje del agua suministrada se infiltre hacia zonas no aprovechables por el sistema radicular de la planta.

Por otra parte, según se va suministrando agua al suelo, la profundidad del perfil de humedad va aumentando de manera significativa, hasta que por la parte final de los surcos se producen escurrimientos del agua de riego que han de seguir un tiempo determinado hasta que se den las condiciones mínimas de perfil húmedo en toda la longitud. Las pérdidas por escorrentía al final del surco y por percolación en los tramos iniciales y medios, son

las que se busca reducir al mínimo con el riego intermitente.

Con este tipo de riego, cuando las descargas sean con ciclos de tiempo fijo, éstos deben ser lo suficientemente largos para que el avance del frente de onda, sobre el suelo del surco ya húmedo en toda su longitud, llegue hasta el extremo final del mismo con la descarga de un solo ciclo. Cuanto más largo sea el surco, mayor ha de ser el tiempo único de ciclo que se fije en el dispositivo automático de alimentación. En un primer ciclo, el flujo de agua alcanzará una distancia mayor que en los siguientes. En éstos, de igual tiempo de duración, el avance en las zonas no humedecidas será más lento y, en consecuencia, los nuevos tramos regados serán más cortos, y así sucesivamente en cada ciclo posterior. Por esto, la infiltración local será mayor en los primeros que en los últimos, pues en éstos dicha infiltración se efectúa sobre una sección ya mojada. El resultado es que el perfil de humedad será menos pronunciado que el conseguido con el riego continuo. Sin embargo, se espera que haya ciertas pérdidas por percolación profunda, ya que en las zonas humedecidas por los primeros ciclos se presentará inevitablemente un exceso de agua infiltrada fuera de la zona radicular. Para evitar que al final del surco la escorrentía sea excesiva, puede acortarse el tiempo del ciclo una vez que el frente de onda ha llegado al final, aunque la operación implica perder algo del perfil de humedad en la cola.

Para aumentar aún más la eficiencia del riego intermitente y evitar pérdidas excesivas por percolación profunda y por escorrentía o coleos, como consecuencia de los ciclos de tiempo constante, es necesario usar ciclos cuyos tiempos serán variables en función de las condiciones y características del suelo y de la parcela (textura del suelo, longitud de los surcos, pendiente del terreno, tipo de cultivo, condición inicial y final de humedad del suelo, etc.). En general, parece conveniente emplear ciclos de corta duración en los primeros tramos de los surcos y ampliar los tiempos cada ciclo hasta llegar al final. Una vez obtenido este primer perfil de humedad, se reducirán los tiempos para evitar en lo posible las pérdidas por escorrentía. Al operar así, la duración variable de los ciclos propiciará:

- Avanzar distancias sensiblemente iguales en cada ciclo.
- Distribuir el agua de manera más uniforme.
- Obtener un perfil de humedad de suelo más apegado a la línea radicular y, por tanto, menores pérdidas por percolación profunda.
- Disminuir las pérdidas por coleos.

Ventajas y desventajas del riego intermitente respecto al riego continuo

De entre las ventajas de la aplicación intermitente de los suministros de caudal, frente a la aplicación continua del mismo durante el riego por gravedad, es importante indicar que son más acentuadas en surcos con longitudes superiores a las recomendadas para la implementación eficiente del riego continuo. En seguida se presenta un resumen de estas ventajas:

- Avance más rápido del frente de onda.
- Mayor uniformidad de aplicación y distribución en el suelo.
- Reducción e incluso eliminación de coleos.
- Posibilidad de aplicar riegos suaves o ligeros.
- Perfil de humedad más apegado a la línea radicular.
- Menores pérdidas por percolación profunda.
- Prevención del lavado de fertilizantes y otros productos químicos.
- Reducción de los requerimientos de mano de obra.
- Mejoramiento del rendimiento potencial de la cosecha.
- Mejor control de la erosión y pérdida del suelo.

Las desventajas del riego intermitente son:

- Su diseño e implementación práctica tiene un mayor grado de complejidad que el riego continuo.
- El equipo de riego tiene un costo de inversión inicial y requiere de un costo de mantenimiento continuo.
- Durante el riego se debe conocer, en todo momento, la secuencia del ciclo en que está operando el sistema. Esto es necesario para continuar manualmente el riego en caso de que el sistema automatizado falle.

Dispositivos de control

En una instalación típica, el agua se suministra a una válvula, ubicada entre dos unidades de riego, que incluye un controlador automatizado de ciclos de descargas de caudal intermitentes. La distribución del agua a cada unidad se realiza mediante tubería con compuertas (véase ilustración 1). Los tipos de válvulas más comúnmente empleados en la actualidad son: de membrana operadas hidráulicamente y mecánicas tipo mariposa.

Las primeras funcionan con la presión del agua de la tubería suministradora que viene del sistema de bombeo. El controlador alterna esa presión entre las dos membranas de la válvula. Cuando una

membrana está sometida a la presión, se expande y corta el paso del agua hacia ese lado; la otra, no sometida a presión, se desinfla y abre el paso del agua hacia su lado. Las válvulas mecánicas tipo mariposa se abren y cierran alternadamente, permitiendo el paso del agua hacia uno u otro lado. Estos dispositivos pueden ser de disco simple o doble. Casi siempre se operan a través de un pequeño controlador automatizado programable, que utiliza energía eléctrica proveniente de baterías convencionales o baterías con paneles solares.

Recientemente, en el IMTA, se desarrolló un dispositivo de control de riego intermitente, denominado diabeto, el cual no requiere de energía externa durante su operación. En él las descargas de caudal intermitente se producen por la automatización fluidica del cebado y descebado de una serie de sifones durante cada ciclo de riego. El diabeto trabaja sólo con ciclos de tiempo constante; atiende una sola unidad de riego, el hidrograma de caudal que produce está regulado por la ley de descarga de los sifones y su diseño y dimensiones dependen de las características de la unidad que se va a regar.

Secuencia ilustrativa en el riego intermitente

En la ilustración 2 se ejemplifica una secuencia del comportamiento del flujo durante el riego intermitente. En ella se considera que el dispositivo de alimentación intermitente es un diabeto y se emplea la nomenclatura siguiente:

Qa = Gasto de alimentación al diabeto.

Qd = Gasto descargado por el diabeto durante el impulso.

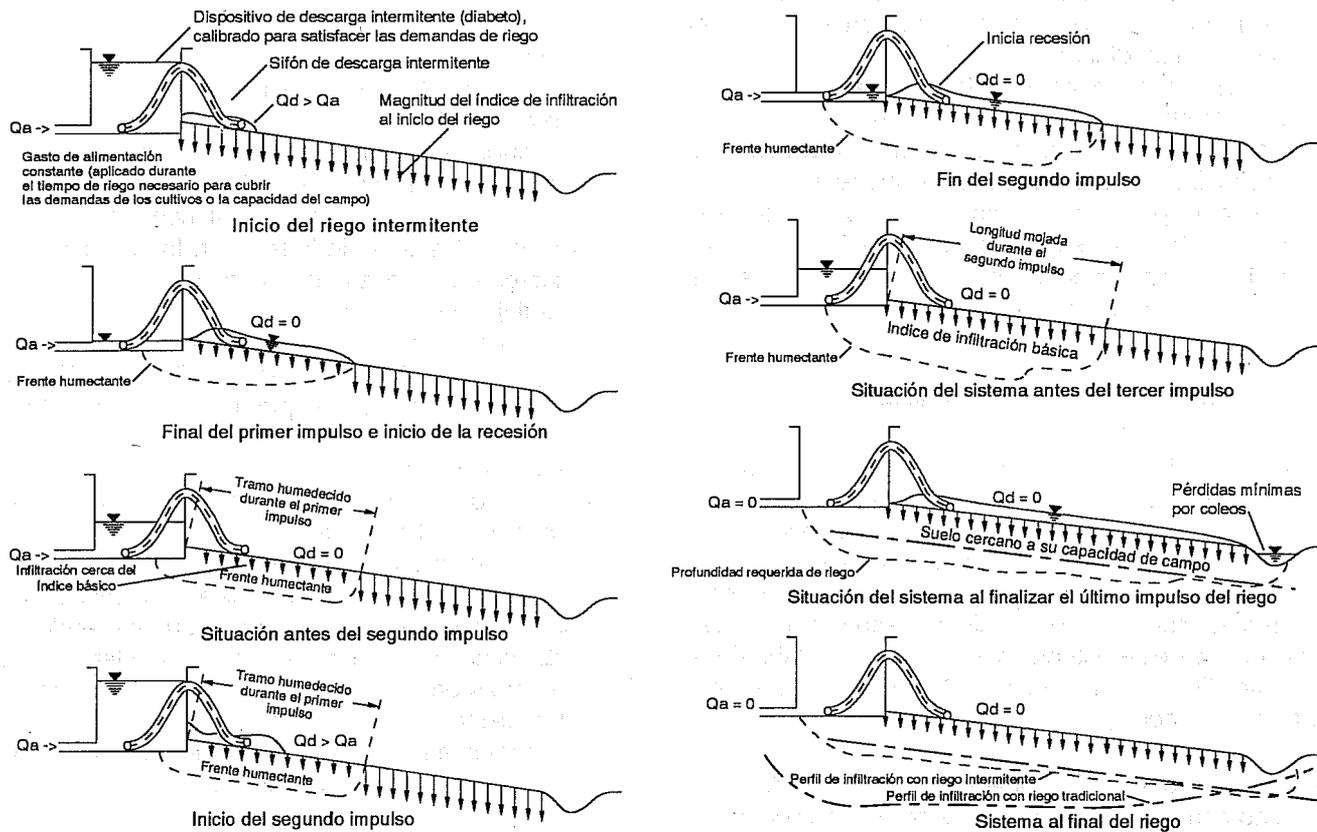
Simulación numérica del riego intermitente

Revisión bibliográfica

A la fecha, la simulación numérica del flujo en sistemas de riego por gravedad se ha realizado con diversos tipos de modelos matemáticos, como son:

- Hidrodinámicos, a partir de versiones completas de las ecuaciones de Saint-Venant (Basset, 1972; Katopodes, 1977; Kinkaid, 1972; Sakkas y Strelkoff, 1974; Schmitz, Haverkamp y Palacios, 1985).
- De inercia-cero, con base en versiones simplificadas de las ecuaciones de Saint-Venant, en las cuales se han eliminado los términos inerciales

2. Secuencia ilustrativa del comportamiento del flujo durante el riego intermitente



de la ecuación de conservación de cantidad de movimiento (Elliot y Walker, 1982; Jaynes, 1986; Strelkoff y Katopodes, 1977).

- Basados en la ecuación de onda cinemática (Chen, 1970; Sherman, 1982; Smith, 1972; Izuno y Podmore, 1984; Walker y Humpherys, 1983).
- Por balance de volumen; basados en la ecuación de conservación de masa y en una relación de almacenamiento–descarga que sustituye a la ecuación de la energía (Essafi, 1982; Ley, 1978; Singh y Yu–Chen He, 1988).

Todos estos modelos son aplicables para la simulación del avance del frente de onda; algunos sirven para simular el proceso de recesión y normalmente sólo son válidos para bordos, o sea conducciones rectangulares (Jaynes, 1986). De hecho, son pocos los que se pueden emplear para el estudio del problema en surcos (Walker y Humpherys, 1983).

La mayoría de los modelos señalados ha sido desarrollada y verificada sólo para el caso del riego continuo. Tal vez el que ha producido mejores resultados, es el propuesto por Walker y Humpherys (1983) y posteriormente adoptado y modificado por Izuno y Podmore (1984).

No obstante la gran cantidad de trabajos sobre el tema, aún existen varios problemas sin solucionar y una serie de aspectos discutibles que deben ser tomados en cuenta para lograr una adecuada solución física del problema. Del análisis de varios factores que se consideran fundamentales para la solución y simulación numérica del riego intermitente, se adoptaron los siguientes lineamientos básicos para el modelo de simulación que se presenta en este trabajo:

- Desarrollar un modelo general, que permita tomar en cuenta cualquier tipo de sección transversal de la conducción, o sea, que pueda ser aplicable tanto en bordos como en surcos y cualquier otra variante.
- Elaborar una metodología confiable y general para la simulación de la onda de recesión.
- Estudiar el comportamiento de la intensidad de infiltración entre impulsos y establecer los criterios adecuados para su simulación numérica.
- Desarrollar un modelo hidrodinámico basado en las ecuaciones completas de Saint–Venant, sencillo de entender a nivel conceptual, competitivo computacionalmente respecto a los modelos simplificados y superior a éstos en cuanto a precisión.

- Verificar la bondad y los límites de aplicación de modelos simplificados en comparación con el modelo hidrodinámico completo.
- Realizar análisis de sensibilidad para determinar la precisión que se deberá manejar durante la obtención de los datos de campo requeridos para la simulación del problema a tiempo real.
- Crear un programa de cómputo, de fácil acceso y operación, lo suficientemente flexible para ser utilizado en diversos casos y condiciones de trabajo del sistema de riego.

Ecuaciones que describen el fenómeno

Antes de iniciar el desarrollo del modelo de simulación, se realizó un análisis detallado de las ecuaciones fundamentales que lo describen. Esta iniciativa se justifica claramente si se toma en cuenta que en la literatura especializada se exponen diferentes criterios sobre dichas ecuaciones. Del resultado de este estudio, sobre el cual se elaboró un informe (García V. N., 1989), se llegó a una serie de importantes conclusiones:

- Las ecuaciones fundamentales que describen el fenómeno en su parte superficial, considerando el flujo unidimensional, son las expresiones completas de Saint-Venant.
- Para representar el flujo sub-superficial, lo más apropiado sería emplear un modelo basado en la ecuación de conservación de masa y en la de Darcy, ambas aplicables a medios porosos. Una ecuación resultante de una combinación de éstas y que puede ser útil es la de Richards o alguna otra derivada de la misma. Desafortunadamente, para su aplicación práctica, estas expresiones requieren de información relacionada con las características y estados de humedad del suelo, lo que implica equipos especiales para su obtención en el campo.
- El problema se puede simplificar, sin afectar mucho el comportamiento real del flujo, mediante ecuaciones empíricas que tomen en cuenta el proceso de infiltración. Una de las ecuaciones más apropiadas para tal fin es la de Kostiaikov modificada. Esta característica simplificatoria permite que se pueda estudiar totalmente el problema superficial sin que sea necesario conocer el comportamiento del flujo sub-superficial.
- La sustitución de las ecuaciones completas de Saint-Venant por sistemas simplificados implica aceptar una serie de hipótesis restrictivas que limitan ampliamente los rangos de aplicación

de los modelos de simulación resultantes:

- Los de inercia-cero requieren que los efectos inerciales sean despreciables durante todo el proceso de riego, lo cual es muy cuestionable cuando se tienen pendientes de plantilla y gastos de descarga considerablemente altos.
 - Los de onda cinemática tienen limitaciones adicionales a las indicadas en los modelos de inercia-cero, pues en general se considera que el flujo está normalizado, o sea, que las áreas y velocidades del flujo están relacionadas por alguna expresión derivada de la ecuación de Chezy, como por ejemplo, la de Manning. Esta situación limita los modelos a sistemas de riego con una cierta pendiente.
 - Los modelos de balance de volumen normalmente se basan en una relación lineal de almacenamiento-descarga (por ejemplo del tipo de Muskingum), lo cual implica la estimación de una serie de factores de peso que depende de datos del comportamiento propio del fenómeno, en otras palabras, que en la realidad son modelos calibrados. Estos son aplicables sólo a los sistemas en que se han calibrado o a otros con características muy semejantes.
- La simulación del flujo transitorio unidimensional a superficie libre con una frontera móvil, implica que la malla de cualquier esquema discreto de solución numérica se incrementa a través del tiempo; esto es ocasionado por efecto del propio crecimiento de la región de flujo que representa. De aquí que, desde el punto de vista computacional, a medida que se avanza en la solución sea necesario utilizar mayor capacidad de memoria y, en consecuencia, también mayores tiempos de máquina. Para simplificar esta problemática se ha propuesto (Aldama-Martínez, 1988) el uso de una transformación adimensional de la coordenada espacial, lo cual permite emplear una malla que se adapta a la región de flujo sin importar que ésta se deforme debido a la frontera móvil. A partir de esta idea, se pueden transformar las ecuaciones de Saint-Venant, de forma tal que el número de nudos en la coordenada espacial de la región discreta, en que se aplique un esquema en diferencias finitas, permanezca constante a través del tiempo, siendo por tanto independiente del crecimiento de la región de flujo. Aplicando este criterio, resulta factible y adecuado simular el flujo intermitente con un modelo discreto basado en una versión transformada adimensionalmente de las ecuaciones de Saint-Venant.

Ecuaciones transformadas

Una de las formas posibles de representar las ecuaciones de Saint-Venant (García V., 1989) es:

*Conservación de masa

$$\frac{\partial Q}{\partial s} + \frac{\partial A}{\partial t} = ql \quad (1)$$

*Conservación de la cantidad de movimiento

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + 2u \frac{\partial Q}{\partial s} + (c^2 - u^2) \frac{\partial A}{\partial s} = gA(s_o - s_f) \quad (2)$$

En la ecuación (1) el término ql representa la sustracción de masa por efecto de la infiltración del flujo a través de la superficie del suelo. La infiltración se puede representar como la variación del volumen total infiltrado por unidad de longitud del conducto a través del tiempo (Elliot, Walker y Skogerboe, 1982):

$$ql = \frac{\partial Z}{\partial t} \quad (3)$$

En esta relación Z se puede evaluar con auxilio de alguna expresión diferencial basada en la ecuación de conservación de masa, aplicada a un volumen diferencial de suelo, o por una relación empírica como la ecuación de Kostikov modificada. En este trabajo se adoptó esta última, cuya expresión es:

$$Z = S_z \tau_{op}^{Bz} + A z \tau_{op}$$

Sustituyendo (3) en (1) se obtiene:

$$\frac{\partial Q}{\partial s} + \frac{\partial A}{\partial t} = \frac{\partial Z}{\partial t} \quad (4)$$

Si en las ecuaciones (2) y (4) se introducen la variable espacial adimensional $\xi = s/sc$ y una nueva variable τ que representa el tiempo, se obtienen las ecuaciones adimensionalizadas espacialmente:

*Conservación de masa

$$\frac{\partial A}{\partial \tau} - \frac{\xi}{sc} \frac{dsc}{dt} \frac{\partial A}{\partial \xi} + \frac{1}{sc} \frac{\partial Q}{\partial \xi} = \frac{\partial z}{\partial \tau} - \frac{\xi}{sc} \frac{dsc}{d\tau} \frac{\partial z}{\partial \xi} \quad (5)$$

*Conservación de la cantidad de movimiento

$$\frac{\partial Q}{\partial \tau} + \left(-\frac{\xi}{sc} \frac{dsc}{dt} + \frac{2u}{sc} \right) \frac{\partial Q}{\partial \xi} + \frac{1}{sc} (c^2 - u^2) \frac{\partial A}{\partial \xi} = gA(s_o - s_f) \quad (6)$$

Es importante tener en cuenta que la longitud del perfil de flujo en el plano transformado adimensional permanece siempre constante y la distancia adimensional ξ está siempre comprendida entre 0 y 1.

Esquema implícito

Las ecuaciones (5) y (6) pueden ser expresadas también en la forma:

*Conservación de masa

$$\frac{\partial A}{\partial \tau} + \alpha \frac{\partial A}{\partial \xi} + \gamma \frac{\partial Q}{\partial \xi} = \frac{\partial z}{\partial \tau} + \alpha \frac{\partial z}{\partial \xi} \quad (7)$$

*Conservación de la cantidad de movimiento

$$\frac{\partial Q}{\partial \tau} + \beta \frac{\partial Q}{\partial \xi} + \theta \frac{\partial A}{\partial \xi} = gA(s_o - s_f) \quad (8)$$

donde

$$\alpha = -\frac{\xi}{sc} \frac{dsc}{dt}, \quad \gamma = \frac{1}{sc},$$

$$\beta = \alpha + \gamma 2u, \quad \theta = \gamma (c^2 - u^2)$$

Adoptando la ecuación de Manning para evaluar la pendiente de fricción s_f , al sustituir dicha expresión en (8) y despejar Q se obtiene:

$$Q = \left(g s_o A - \frac{\partial Q}{\partial \tau} - \beta \frac{\partial Q}{\partial \xi} - \theta \frac{\partial A}{\partial \xi} \right)^{1/2} \frac{R^{2/3} A^{1/2}}{ng^{1/2}} \quad (9)$$

dividiendo entre A , tomando en cuenta que $u = Q/a$, resulta:

$$u = \left(g s_o A - \frac{\partial Q}{\partial \tau} + \beta \frac{\partial Q}{\partial \xi} + \theta \frac{\partial A}{\partial \xi} \right)^{1/2} \frac{A^{1/6}}{ng^{1/2} P^{2/3}}$$

de aquí que (9) se pueda expresar en la forma:

$$Q = uA \quad (10)$$

Sustituyendo (10) en (7), se obtiene:

$$\frac{\partial A}{\partial \tau} + Fu \frac{\partial A}{\partial \xi} + \gamma A \frac{\partial u}{\partial \xi} = ql \quad (11)$$

donde $Fu = \alpha + \gamma u$

Tomando en cuenta la representación diferencial de u , la ecuación (10) junto con la (11) constituyen las ecuaciones diferenciales sobre las cuales se

desarrolló el esquema de solución numérica. Las funciones de red en diferencias finitas, propuestas para representar dichas ecuaciones, son del tipo implícito y están dadas por:

Ecuación modificada de conservación de masa (ecuación 11)

Cuantificación de la infiltración:

$$ql_i = \frac{Z_{i+1}^n - Z_i^n}{\Delta\tau} + \alpha_i^n \frac{Z_{i+1}^n - Z_i^n}{\Delta\xi}$$

Nudos centrales:

$$a_{i,1}A_{i-1}^{n+1} + a_{i,2}A_i^{n+1} + a_{i,3}A_{i+1}^{n+1} = b_i \quad (12)$$

donde

$$\begin{aligned} a_{i,1} &= 2\Delta\xi - 2.5\Delta\tau Fu_i, \\ a_{i,2} &= 2\Delta\xi + 2\Delta\tau Fu_i + \gamma\Delta\tau Du, \\ a_{i,3} &= \frac{1}{2}\Delta\tau Fu_i, \\ Du &= [u_{i+1}^n - u_{i-1}^n], \\ Fu_i &= \alpha_i + \gamma u_i^n, \\ b_i &= 2\Delta\xi(A_{i-1}^n + A_i^n) + \frac{\Delta\tau Fu_i}{2} [A_{i-1}^n - A_{i+1}^n] \\ &\quad - \gamma\Delta\tau A_i^n Du + 4ql_i \Delta\xi \Delta\tau \end{aligned}$$

Frontera izquierda:

$$a_{i,2}A_i^{n+1} + a_{i,3}A_{i+1}^{n+1} = b_i \quad (13)$$

donde

$$\begin{aligned} a_{i,2} &= \Delta\xi - \Delta\tau Fu_i + \gamma\Delta\tau Du, \\ a_{i,3} &= \Delta\xi + \Delta\tau Fu_i + \gamma\Delta\tau Du, \\ Du &= [u_{i+1}^n - u_i^n], \\ Fu_i &= \alpha_i + \gamma u_i^n, \\ b_i &= \Delta\xi(A_{i+1}^n + A_i^n) + \Delta\tau Fu_i [A_i^n - A_{i+1}^n] \\ &\quad + 2ql_i \Delta\xi \Delta\tau \end{aligned}$$

Frontera derecha:

$$a_{i,1}A_{i-1}^{n+1} + a_{i,2}A_i^{n+1} = b_i \quad (14)$$

donde

$$\begin{aligned} a_{i,1} &= \Delta\xi - \Delta\tau Fu_i + \gamma\Delta\tau Du, \\ a_{i,2} &= \Delta\xi + \Delta\tau Fu_i + \gamma\Delta\tau Du, \\ Du &= [u_i^n - u_{i-1}^n], \\ Fu_i &= \alpha_i + \gamma u_i^n, \end{aligned}$$

$$b_i = \Delta\xi(A_{i-1}^n + A_i^n) + \Delta\tau Fu_i [A_{i-1}^n - A_i^n] + 2ql_i \Delta\xi \Delta\tau$$

Evaluación de u_i^n

Nudos centrales:

$$\begin{aligned} u_i^n &= \left[gSoA_i^n - \frac{Q_{i+1}^n + Q_{i-1}^n - Q_{i+1}^{n-1} - Q_{i-1}^{n-1}}{2\Delta\tau} \right. \\ &\quad \left. - \beta_i^n \frac{Q_{i+1}^n - Q_{i-1}^n}{2\Delta\xi} \right. \\ &\quad \left. - \theta_i^n \frac{A_{i+1}^n - A_{i-1}^n}{2\Delta\xi} \right]^{1/2} \frac{A_i^{n^{1/6}}}{ng^{1/2} P_i^{n^{2/3}}} \quad (15) \end{aligned}$$

Frontera izquierda:

$$\begin{aligned} u_i^n &= \left[gSoA_i^n - \frac{Q_{i+1}^n + Q_i^n - Q_{i+1}^{n-1} - Q_i^{n-1}}{2\Delta\tau} \right. \\ &\quad \left. - \beta_i^n \frac{Q_{i+1}^n - Q_i^n}{\Delta\xi} \right. \\ &\quad \left. - \theta_i^n \frac{A_{i+1}^n - A_i^n}{\Delta\xi} \right]^{1/2} \frac{A_i^{n^{1/6}}}{ng^{1/2} P_i^{n^{2/3}}} \quad (16) \end{aligned}$$

Frontera derecha:

$$\begin{aligned} u_i^n &= \left[gSoA_i^n - \frac{Q_i^n + Q_{i-1}^n - Q_i^{n-1} - Q_{i-1}^{n-1}}{2\Delta\tau} \right. \\ &\quad \left. - \beta_i^n \frac{Q_i^n - Q_{i-1}^n}{\Delta\xi} \right. \\ &\quad \left. - \theta_i^n \frac{A_i^n - A_{i-1}^n}{\Delta\xi} \right]^{1/2} \frac{A_i^{n^{1/6}}}{ng^{1/2} P_i^{n^{2/3}}} \quad (17) \end{aligned}$$

Las relaciones (15), (16) y (17) son válidas siempre que $Q_i^n > 0$, en caso de que $Q_i^n = 0$ se considera $u_i^n = 0$.

Cuantificación del gasto

Nudos centrales y frontera derecha:

$$Q_i^{n+1} = u_i^n A_i^{n+1} \quad (18)$$

Frontera izquierda:

Q_1^{n+1} = función del tiempo, o sea, está dada por un hidrograma

Cuantificación del área hidráulica

Nudos centrales y frontera derecha:

Los valores de A_i^n se obtienen al solucionar, por el método del doble barrido, el sistema de ecuaciones lineales tripuntuales que resulta al aplicar las relaciones (12), (13) y (14) en los $N - 1$ nudos de la malla ($i = 2, 3, 4, \dots, N$).

Frontera izquierda:

a) Avance del frente de onda

En esta frontera se conoce el gasto Q_1^{n+1} durante toda la simulación y para evaluar A_1^{n+1} se propone la siguiente metodología:

En la frontera izquierda se cumple $s = 0$ y, por lo tanto, $\xi = s/sc = 0$, y al sustituir en las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento resulta:

*Conservación de masa

$$\frac{\partial A}{\partial \tau} + \gamma \frac{\partial Q}{\partial \xi} = \frac{\partial z}{\partial \tau} \quad (19)$$

*Conservación de la cantidad de movimiento

$$\frac{\partial Q}{\partial \tau} + \gamma 2u \frac{\partial Q}{\partial \xi} + \gamma (c^2 - u^2) \frac{\partial A}{\partial \xi} = gA(so - sf) \quad (20)$$

Despejando $\frac{\partial Q}{\partial \xi}$ de (19) y sustituyendo en (20) resulta:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial \tau} + 2u \frac{\partial z}{\partial \tau} - 2u \frac{\partial A}{\partial \tau} \\ + \gamma (c^2 - u^2) \frac{\partial A}{\partial \xi} = gA(so - sf) \end{aligned} \quad (21)$$

Tomando en cuenta que:

$$u = Q/A, \quad c^2 = gA/B, \quad sf = (n^2 Q^2 P^{4/3})/A^{10/3}$$

al sustituir en (21) y operar algebraicamente, se obtiene:

$$\begin{aligned} \left(gso - \frac{g}{scB} \frac{\partial A}{\partial \xi} \right) A^{10/3} + 2Q \left(\frac{\partial A}{\partial \tau} - \frac{\partial z}{\partial \tau} \right) A^{4/3} \\ - \frac{\partial Q}{\partial \xi} A^{7/3} + \frac{Q^2}{sc} \frac{\partial A}{\partial \xi} A^{1/3} - gn^2 Q^2 P^{4/3} = 0 \end{aligned} \quad (22)$$

Si esta ecuación se discretiza asignando:

$$A = [A_i^{n+1} + (A_i^n + A_{i+1}^n)/2]/2$$

$$\frac{\partial A}{\partial \xi} = \frac{A_{i+1}^n - \frac{1}{2}(A_i^{n+1} + A_i^n)}{\Delta \xi}, \quad \frac{\partial A}{\partial \tau} = \frac{A_i^{n+1} - A_i^n}{\Delta \tau}$$

$$P = \text{función de } A, \quad B = \text{función de } A, \quad Q = [Q_i^{n+1} + (Q_i^n + Q_{i+1}^n)/2]/2$$

Resulta una ecuación no lineal con respecto a A_i^{n+1} , la cual se soluciona numéricamente con el método de Newton-Raphson. De esta manera, considerando $i = 1$, se obtiene A_1^{n+1} .

b) Recesión de onda

La solución numérica obtenida a partir de la ecuación (22) se considera válida siempre y cuando exista gasto de alimentación ($Q_1^{n+1} > 0$), o sea, mientras no se inicie la recesión. Para evaluar este proceso, se optó por utilizar una relación basada en la ecuación de cantidad de movimiento, la cual resulta de considerar que el proceso de vaciado está regido principalmente por el equilibrio entre las fuerzas gravitatorias y las de cortante dentro del volumen de flujo comprendido entre las dos primeras secciones de la malla; de esta manera, se adoptó la siguiente relación:

$$\begin{aligned} h_i^{n+1} = h_{i+1}^{n+1} + \frac{Q_{i+1}^{n^2}}{2gA_{i+1}^{n^2}} \\ - sc\Delta\xi \left[so - \frac{n^2 Q_{i+1}^{n^2} P_{i+1}^{n^2/3}}{2A_{i+1}^{n^2/3}} + \frac{Q_{i+1}^n q l_i}{2gA_{i+1}^{n^2}} \right] \end{aligned}$$

Una vez conocido el tirante h_i^{n+1} , se evalúa el área hidráulica; para esto se utiliza la función geométrica que las relaciona, la cual depende de la forma de la sección transversal de la conducción:

$$A_{i+1}^{n+1} = f(h_{i+1}^{n+1}) \quad (23)$$

Posición del frente de onda

La nueva posición del frente de onda, durante el avance de la misma, se determina a partir de la siguiente expresión:

$$s_c^{n+1} = s_c^n + \frac{\Delta\tau [Q_{N-1}^{n+1} + Q_N^{n+1} - Q_{N-1}^n]}{A_{N-1}^{n+1} - A_N^{n+1} + A_{N-1}^n - Z_{N-1}^{n+1}} \quad (24)$$

El último término de esta relación se obtiene discretizando la ecuación de conservación de masa aplicada al nudo N ubicado en la posición del frente de onda y considerando: $A_N^n = 0, Q_N^n = 0$.

Evaluación de la infiltración

En las regiones de surco donde la descarga es relativamente constante entre ciclo y ciclo, la infiltración se puede evaluar a partir de dos ecuaciones de Kostiaikov-Lewis (Walker y Humpherys, 1982):

- Para surco seco (región de surco mojada durante el primer ciclo):

$$Z_c = S_z \tau_{op}^{Bz} + A_z \tau_{op} \quad (25)$$

- Para surco húmedo (región de surco mojada a partir del tercer ciclo en adelante):

$$Z_s = S_z' \tau_{op}^{Bz'} + A_z' \tau_{op} \quad (26)$$

En esta ecuación se toma el tiempo de oportunidad acumulado, o sea, la suma de tiempo de oportunidad total sobre la sección en estudio en función del número de ciclos aplicados.

De acuerdo con las observaciones de campo realizadas por Walker (1982) y verificadas experimentalmente por Malano (1982), la infiltración durante el segundo ciclo que moja una región de surco puede ser evaluada con la siguiente relación:

$$Z_s = S_z'' \tau_{op}^{Bz''} + A_z'' \tau_{op} \quad (27)$$

donde

$$S_z'' = S_z' + (S_z + S_z')T \quad (28)$$

$$B_z'' = B_z' + (B_z - B_z')T \quad (29)$$

$$A_z'' = A_z' + (A_z - A_z')T \quad (30)$$

$$T = [(s - \bar{s}_{i-2}) / (\bar{s}_{i-1} - \bar{s}_{i-2})]^\lambda \quad (31)$$

siempre que

$$\bar{s}_{i-2} \leq s \leq \bar{s}_{i-1}$$

$$T = 1$$

siempre que

$$s < \bar{s}_{i-2}$$

siendo s = posición del punto de interés durante el tiempo actual de cálculo, \bar{s}_{i-1} y \bar{s}_{i-2} = distancias avanzadas por el frente de onda durante los $i - 1$ e $i - 2$ ciclos y λ = constante empírica con rango de valores comprendido entre 2 y 5 dependiendo del tipo de suelo (un valor medio que proporciona resultados aceptables es $\lambda = 3$).

Procedimiento de cálculo

Datos requeridos:

- Gasto de alimentación (Q_0) [$Q_i^n = Q_0$ = hidrograma de entrada]
- Coefficiente de rugosidad de Manning (n).
- Ecuaciones que describen la geometría de la sección transversal de la conducción [área hidráulica (A), perímetro mojado (P), radio hidráulico (R), ancho de superficie libre (B)].
- Pendiente de la plantilla de la conducción (s_0).
- Coefficientes empíricos ($S_z, B_z, A_z, S_z', B_z', A_z'$ y A_z'').
- Número de nudos de la red (N), se recomienda como mínimo $N=5$.
- Incremento de tiempo ($\Delta\tau$), se recomienda de 60 a 180 s y realizar pruebas de convergencia aumentando o disminuyendo este valor. En las corridas realizadas se encontró que un valor de $\Delta\tau = 60$ s es apropiado, obteniéndose resultados satisfactorios para todos los casos.
- Perfil inicial uniformizado (suposición de condición inicial).
- Como datos complementarios se deben tener en cuenta: la longitud total de la conducción y el tiempo de aplicación (tiempo on) del gasto Q_0 .

Cálculo numérico

Una vez conocidos los datos de partida para el tiempo τ^n , se calculan los nuevos valores del área A_1^{n+1} con auxilio de la ecuación (22) ó (23) según el caso; posteriormente se calculan las áreas A_i^{n+1} en los nudos 2 a N con la solución del sistema de ecuaciones resultante de aplicar las ecuaciones (12), (13) y (14) en los nudos correspondientes;

a continuación se calculan las velocidades u_i^n ($i = 1, 2, 3, \dots, N$) mediante las relaciones (15), (16) y (17) que les correspondan y, finalmente, los gastos Q_i^{n+1} ($i = 2, 3, 4, \dots, N$) con la expresión (18). De esta manera, se conocen las características hidráulicas para el tiempo τ^{n+1} . Mientras el frente de onda no alcance el final de la conducción, la nueva posición del mismo será evaluada con la ecuación (24).

Esta secuencia de cálculo se considera como la base para el desarrollo de un programa de cómputo. En el IMTA, actualmente se cuenta con un programa que es útil tanto para la simulación como para el diseño.

Diseño de riego intermitente

Para el diseño o manejo del riego intermitente, es necesario seleccionar tanto el caudal que se introduce a cada uno de los surcos como el tiempo de apertura on , de tal manera que se obtengan las mínimas pérdidas tanto por percolación profunda, fuera de la zona radicular, como por escurrimientos de caudal –coleos– al final del surco.

Caudal

El límite superior está acotado por el caudal máximo no erosivo y por la capacidad máxima de conducción que evita el desbordamiento en los surcos. El límite inferior debe ser tal que exceda la velocidad de infiltración del suelo en la superficie regada.

Tiempo de apertura "on"

• Criterios empíricos

Cuando se desea que el frente de onda alcance el final del surco en 4 ciclos (longitudes de surco menores a 400 m) ó 6 ciclos (longitudes de surco mayores a 400 m) y que el tiempo real de suministro de agua por surco sea la mitad del que se necesita en el riego convencional, se recomienda utilizar las siguientes relaciones empíricas para determinar el tiempo de apertura on , de cada ciclo de avance.

Para surcos menores de 400 m, se recomienda adoptar:

$$\text{tiempo } on = \frac{\text{tiempo para alcanzar el final del surco con riego continuo}}{8}$$

Para surcos mayores de 400 m, se recomienda:

$$\text{tiempo } on = \frac{\text{tiempo para alcanzar el final del surco con riego continuo}}{12}$$

- Métodos prácticos basados en mediciones de campo

En este inciso se presentan cuatro métodos para determinar los tiempos on apropiados:

a) Método IMTA

Consiste en llevar al suelo a condiciones de capacidad de infiltración equivalentes a las condiciones finales del riego intermitente. Una forma práctica para determinar el tiempo on que se debe de utilizar en ciclos de tiempo fijo, aplicable normalmente para surcos de longitudes menores a 400 m, es la siguiente:

- Se aplica un riego continuo a un grupo de surcos en los que se desea establecer el riego intermitente.
- Una vez concluido el riego, se suministra nuevamente el caudal al grupo de surcos previamente regados y se cuantifica el tiempo promedio que tarda el frente de onda en alcanzar el final de los surcos.
- El tiempo on , que se propone adoptar, es igual al tiempo promedio en que el frente de onda alcanzó el final de los surcos.

Existen observaciones experimentales realizadas en diferentes tipos de suelos, reportadas por diversos investigadores, que permiten tener una idea de la magnitud del tiempo de avance del frente de onda. Algunas de ellas indican que el tiempo de avance de dicho frente sobre superficies de suelo previamente mojadas fluctúa entre 2 y 5 min por cada 30 m, sobre suelo desnudo y de 4 a 8 min por cada 30 m en suelos con cultivos densos que interfieren en el surco.

Es importante hacer notar que este método también puede utilizarse para definir el tiempo on mínimo necesario que se debe mantener una vez que el frente de onda ha alcanzado el final de los surcos, es decir, los tiempos on de los ciclos complementarios para proporcionar la dosis de riego en todo el surco. En general, la adopción de este criterio se acepta en surcos en los que el tiempo de recesión es menor o igual que los tiempos de avance en cada ciclo. Si bien este criterio permite aceptar *a priori* una cierta cantidad de pérdidas por coleos, también permite un mayor tiempo de oportunidad en las partes finales de los surcos y, por lo tanto, la posibilidad de reducir el número de ciclos complementarios. Una ventaja adicional de este método, es que no requiere la instalación previa del sistema de riego para determinar el tiempo on .

b) Método tiempo constante – distancia variable

Esta opción se utiliza más eficientemente en longitudes de surcos menores de 400 m y cuando el controlador no tiene la capacidad de emplear diferentes tipos de apertura. Consta de los siguientes pasos:

- Se establecen dos unidades de riego con el controlador interconectado a ambas.
- Se colocan estacas o señales a lo largo de la longitud de los surcos, normalmente a intervalos de 30 metros.
- Se comienza el riego.
- Se permite que el frente de onda avance en los surcos aproximadamente una distancia comprendida entre el 30 y 40% de su longitud. Se utiliza este tiempo como tiempo *on* constante.

La utilización de un tiempo *on* constante da como resultado una longitud cada vez menor de surco seco que se moja en cada ciclo. Dicha longitud debería ser aproximadamente del 75% de la longitud de surco que fue mojada con el impulso anterior. Si esto no se consigue, se recomienda incrementar el tiempo *on* constante con intervalos de media hora, hasta conseguir dicho incremento.

Existe una gran desventaja cuando se utiliza un tiempo de apertura *on* constante. Esta consiste en que una vez que el agua ha avanzado hasta el final de los surcos, el tiempo *on* constante es excesivo y ocasionará una escorrentía importante. Por lo tanto, una vez que el frente de onda alcanza el final de la parcela, en el controlador debe programarse un tiempo de apertura *on* reducido, que permita avanzar al agua en los surcos mojados hasta aproximadamente 3/4 partes de su longitud total. En este momento, debería cambiar la entrada del agua a la otra unidad. Este será el tiempo *on* final. Idealmente, el agua que permanece en los surcos continuará avanzando hasta el final de los mismos. Si esto no sucede, debería incrementarse el tiempo *on* final.

c) Método tiempo variable – distancia constante

Este parece ser la opción más eficiente para el riego intermitente, y en especial, cuando las longitudes de los surcos sobrepasan los 400 m. Para aplicarla es necesario que los controladores tengan capacidad de programar automáticamente diferentes tiempos *on*, para lo cual:

- Se establecen dos unidades de riego con el controlador interconectado a ambas.
- Se colocan estacas o señales a lo largo del surco, a intervalos recomendados de 30 metros.
- Se inicia el riego.
- Se permite que el frente de onda avance en los surcos de una unidad hasta que en aproximadamente un 75% de éstos alcance unos 90 m. Entonces, se cambia la introducción del agua a la otra unidad y se realiza el mismo proceso. El tiempo así obtenido corresponde al tiempo *on* inicial.
- Durante el segundo ciclo, se deja que el frente de onda avance la longitud de los surcos humedecida en el primer ciclo y una distancia adicional comprendida entre 90 y 150 m sobre la parte seca de los surcos. El tiempo necesario para que el frente de onda recorra esta longitud corresponde al segundo tiempo *on*.
- Se repite el proceso anterior para determinar los tiempos *on* de los ciclos posteriores, mojando longitudes constantes de la parte seca de los surcos en cada nuevo ciclo, hasta que el frente de onda alcance el final de la parcela.
- Una vez que el frente de onda alcanza el final de la parcela, debe programarse en el controlador un tiempo *on* final reducido, para lo cual se siguen los mismos criterios indicados en el método inmediato anterior.

d) Método de incremento de caudal

Este método utiliza parte de los dos últimos mencionados para conseguir la velocidad de avance de los surcos. La diferencia es que se cambia el número de surcos por unidad de riego:

- Se establecen dos unidades de riego con el controlador interconectado a ambas.

Estas unidades de riego tienen sólo la mitad o tres cuartos del número de surcos que normalmente se usan por unidad en los dos métodos anteriores.

El propósito de reducir el número de riegos es incrementar el caudal que se introduce en cada surco, proporcionando por tanto una velocidad de avance mayor. Este caudal deberá ser menor que el caudal máximo no erosivo.

La experiencia indica que esta opción funciona mejor en suelos con infiltración alta o en casos de surcos extremadamente largos. No es adecuada para longitudes de surcos normales en suelos con baja infiltración.

- Se comienza el riego.
- Se siguen los criterios del método tiempo variable-distancia constante o del método tiempo constante-distancia variable, hasta alcanzar el final del surco.
- El tiempo on final normalmente se iguala con el tiempo necesario para que el frente de onda alcance $3/4$ partes de la longitud total de los surcos ya mojados.
- Después de que el frente de onda alcanza el final del surco, se abren las dos válvulas de riego intermitente y se riegan simultáneamente las dos unidades. Con este procedimiento se produce una reducción del caudal suministrado en cada surco y, en consecuencia, se reducen también las pérdidas por escurrimientos al final de los surcos.

NOTA:

Debido a que las condiciones de los surcos cambian, es recomendable estudiar más de un riego. Si las características de infiltración del suelo y la hidrodinámica del flujo subsuperficial cambian significativamente entre un riego y otro, se hace necesario, por razones de operación eficiente, seleccionar diferentes tiempos on para cada riego.

• Métodos basados en simulación numérica

Los métodos empíricos y prácticos descritos anteriormente permiten definir una política de operación del sistema, por medio de la cual es factible establecer el riego intermitente. Sin embargo, en ningún momento se toman en cuenta, de manera explícita, las eficiencias en la distribución y aplicación de los volúmenes de agua proporcionados durante el riego.

Es de todos conocido que los parámetros que casi siempre rigen la aceptación de un diseño y la implementación práctica de un sistema de riego, se basan fundamentalmente en la verificación de las eficiencias de aplicación y distribución con que funcionará dicho sistema.

Conviene destacar el hecho de que si durante el riego intermitente el frente de onda alcanza el final del surco en un tiempo menor que con el riego continuo, esto de ninguna manera indica que el sistema esté operando con una buena eficiencia. Tal vez la única conclusión que se puede obtener, y que habría que demostrar, es que posiblemente se está regando con una eficiencia mejor que con el riego continuo.

En este inciso se presentan algunas aplicaciones de la simulación numérica, por medio de las cuales es factible establecer criterios de diseño y políticas de

operación eficientes para la implementación del riego intermitente en surcos con longitudes menores a los 400 m, rango común en México, en los cuales se propone el riego con ciclos de tiempo constante.

a) Selección del tiempo de ciclo

Una vez que se han obtenido los datos de campo necesarios para la simulación numérica del riego intermitente (véase la parte de *Simulación numérica del riego intermitente* de este artículo), se procede a la realización de los siguientes pasos:

- Se supone que el suelo a lo largo del surco se encuentra totalmente humedecido y, por lo tanto, su capacidad de infiltración corresponde al valor de la infiltración básica. Esto implica que durante la simulación se considere $Z = Az_{top}$, o sea, se supone que $Sz = 0$ y $BZ = 0$.
- Se realiza la simulación numérica considerando un solo ciclo, es decir, se simula el riego continuo que se produciría en el campo con la infiltración básica.
- Se adopta como tiempo on al tiempo que tarda el frente de onda en alcanzar el final del surco de acuerdo con la simulación numérica.

b) Verificación de la eficiencia de aplicación

- Con el tiempo on (determinado en el inciso anterior), se realiza una nueva simulación considerando ahora los coeficientes completos de la ecuación de infiltración a suelo seco y a suelo húmedo.
- Para esta simulación se consideran 20 ciclos de riego. Esto es con el objetivo de asegurar que durante la simulación se alcanzará el final del surco.
- Se verifica en qué ciclo se alcanzó el final del surco (Cfs) y se cuantifica el tiempo efectivo de riego que se utilizó para alcanzar el final del surco ($tefs = Cfs$ tiempo on).
- Se verifica en qué ciclo se cubrió la dosis de riego al final del surco ($Cdfs$), se cuantifica el tiempo efectivo de riego que se utilizó para que esto se diera ($tefd = Cdfs$ tiempo on), se cuantifica el volumen suministrado hasta ese momento ($Vsd = tefd Qo$) y finalmente se cuantifica la eficiencia de aplicación ($Ea = Dr Ls / Vsd$, donde $Dr =$ dosis de riego en volumen por unidad de longitud de surco y $Ls =$ longitud de surco).

- Se incrementa el tiempo *on* en un 25% (redondeándolo a múltiplos de 5 min) y se cuantifica de nuevo la eficiencia de aplicación siguiendo la metodología arriba descrita. Esto se repite mientras en cada iteración se obtengan eficiencias mayores. Una vez que la eficiencia calculada empieza a descender, se da por terminado el cálculo, adoptándose como tiempo *on* definitivo aquél para el cual se obtuvo la máxima eficiencia de aplicación.

c) Resultados de la metodología

Con la secuencia anterior se obtienen:

- El tiempo *on* para el ciclo constante
- El número de ciclos necesarios para alcanzar el final del surco (*Cfs*)
- El tiempo efectivo de riego para alcanzar el final del surco (*tefs*)
- El número de ciclos necesarios para dar el riego (*Cdfs*)
- El tiempo efectivo total de suministro de agua durante el riego (*tefd*)
- El volumen de agua suministrado a cada surco durante el riego (*Vsd*)
- La eficiencia de aplicación con que se dio el riego (*Ea*)
- Implícitamente se garantiza que con esta política de operación se suministra la dosis de riego en todo el surco.
- Adicionalmente es factible cuantificar el porcentaje global de pérdidas en volumen del agua suministrada durante el riego (pérdidas globales = pérdidas por percolación profunda + pérdidas por coleos), siendo éstas iguales a $Pg = 1 - Ea$.

d) Recomendaciones

Si la eficiencia de aplicación resultante es muy baja existen dos opciones para mejorarla:

- Aumentar o disminuir el caudal suministrado por surco. Para esto se debe vigilar, principalmente, que no se supere el caudal máximo no erosivo.
- Disminuir la longitud del surco. Esta longitud no deberá ser menor que la longitud de surco obtenida con riego continuo y a la cual le corresponde prácticamente la misma eficiencia de aplicación.

Ejemplos de aplicación

Modelación numérica de riego en surcos

Con el fin de tener parámetros de comparación entre la modelación y los datos de campo, se adoptaron los datos utilizados por Elliot, Walker y Skogerboe (1982) y los reportados sobre flujo intermitente por Walker y Humpherys (1983). Para llevar a cabo la simulación se desarrolló un programa de cómputo y para el cálculo numérico se adoptó un intervalo de tiempo Δt fijo de 60 s y una malla de 10 nudos que representa la región unitaria adimensional del flujo. Los resultados obtenidos de las simulaciones y los datos de campo correspondientes se muestran en las ilustraciones 3 y 4, en las cuales se puede apreciar la buena correlación entre éstos.

En la ilustración 5 se muestra un par de curvas de eficiencia de distribución, obtenidas con el modelo de simulación para un mismo tiempo efectivo de riego. Es posible apreciar que es mejor la eficiencia de distribución obtenida con riego intermitente en comparación con la de riego continuo.

Diseño

Tomando los datos generales del surco *Flowell well furrow*, siguiendo el criterio de diseño indicado en el inciso denominado "Métodos basados en simulación numérica", considerando una lámina de riego de 70 mm y una longitud de surco de 320 m, se encontraron los siguientes resultados:

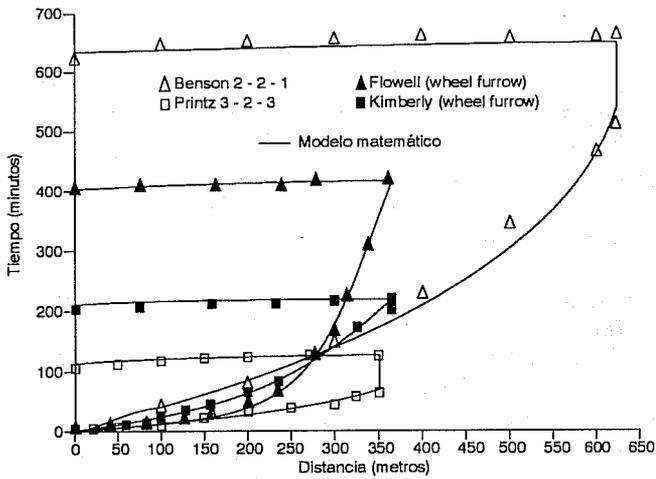
Núm. de ciclos	tiempo <i>on</i> (min)	<i>tef</i> (min)	<i>Ea</i>
1 (continuo)	390	390	48%
4	50	300	62%
6	40	240	78%
8 (óptimo)	30	240	78%
10 (tiempo <i>on</i> mínimo)	25	250	75%

Se observa claramente, para este caso en particular, que con la aplicación del riego intermitente se obtienen eficiencias de aplicación (*Ea*) significativamente mayores que con riego continuo.

Conclusiones

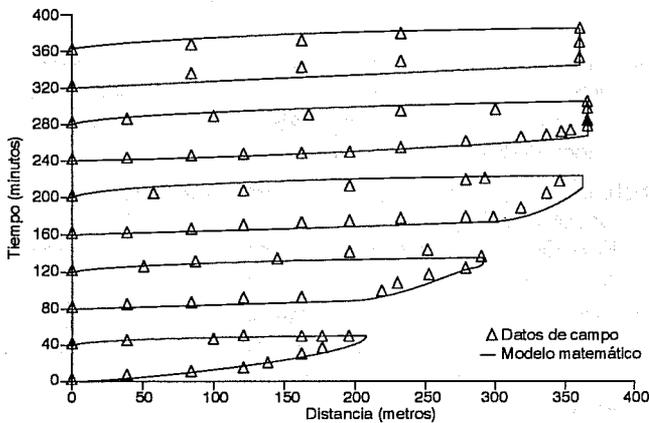
En este trabajo se ha presentado una breve descripción del riego intermitente, se han mencionado sus principales ventajas respecto al riego tradicional, se discutió sobre la importancia de su modelación

3. Riego continuo en surcos



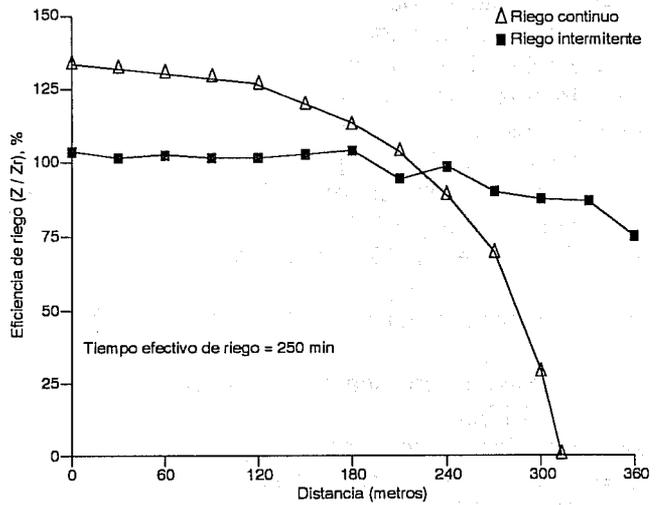
Datos \ Nombre	Flowell	Kimberly	Benson	Printz
Gasto (l/s)	2	1.5	1.14	3.49
Pendiente	.008	.0104	.0044	.0025
Longitud (m)	360	360	625	350
Manning, n	.04	.04	.02	.02
Parámetros sección potencial				
Dp	.3269	.6644	.58	.615
Fp	2.734	2.8787	2.91	2.924
Bp	.782	.962	1.05	1.07
Hp	.536	.6046	.69	.7
Parámetros ecuación Kostiakov				
Sz (m ² /min)	.0028	.00884	.018	.01249
Bz	.534	.212	.02	.024
Az (m ² /min)	.00022	.00017	.0001	.000491
Tiempo riego (min)	400	200	613	110

4. Riego intermitente



Datos \ Nombre	Flowell wheel furrow
Gasto (l/s)	2
Pendiente	.008
Longitud (m)	360
Manning, n	.04
Parámetros sección potencial	
Dp	.3269
Fp	2.734
Bp	.782
Hp	.536
Parámetros ecuación Kostiakov surco seco	
Sz (m ² /min)	.0028
Bz	.534
Az (m ² /min)	.00022
Parámetros ecuación Kostiakov surco húmedo	
Sz' (m ² /min)	.00459
Bz'	.356
Az' (m ² /min)	.00018
Tiempo on (min)	40
Relación de ciclo	.5
Número de impulsos	5

5. Curvas de eficiencia



numérica y se indicaron los objetivos generales de la misma.

Adicionalmente, se ha propuesto un modelo de cómputo basado en una transformación adimensional de las ecuaciones de Saint-Venant y se ha demostrado su aplicación práctica en la simulación de fenómenos reales como es el avance y recesión del frente de onda en sistemas de riego por gravedad, encontrándose una correlación altamente satisfactoria.

Resulta importante resaltar algunas características propias de las ecuaciones transformadas como son el poder generar a partir de ellas esquemas numéricos con malla adaptiva, lo cual en computación es de suma relevancia, ya que permite reducir tanto los tiempos de cómputo como la memoria requerida para el almacenamiento de variables, lo cual es uno de los objetivos fundamentales que se persiguen para lograr una óptima modelación computacional de diversos fenómenos de la Física-Matemática.

Por otro lado, también se mostró que con auxilio de la solución numérica es factible verificar si, en una determinada parcela, con la técnica de descargas intermitentes se puede lograr un mejor uso eficiente del agua comparativamente con el riego tradicional. Esta característica se puede definir comparando tanto la eficiencia de aplicación como la de distribución obtenidas con ambos métodos.

Nomenclatura

- s = Coordenada espacial o tangencial [L]
- t = Tiempo [T]
- A = Area hidráulica [L²]
- Q = Gasto [L³/T]

Q_0 = Gasto de alimentación inicial [L³/T]
 u = Velocidad media del flujo [L/T]
 c = Celeridad de onda [L/T]
 g = Aceleración de la gravedad [L/T²]
 s_0 = Pendiente de la conducción
 sf = Pendiente de fricción
 ql = Gasto lateral [L²/T]
 Z = Volumen infiltrado por unidad de longitud de conducción [L³/L]
 S_z = Constante empírica de la ecuación de Kostia-
 kov [L³/L T^{B_z}]
 B_z = Constante empírica de la ecuación de Kostia-
 kov
 A_z = Constante empírica de la ecuación de Kostia-
 kov [L³/L T]
 sc = Posición del frente de onda [L]
 ξ = Coordenada longitudinal adimensional,
 τ = Tiempo [T]
 n = Coeficiente de rugosidad de Manning [T/L^{1/3}]
 R = Radio hidráulico [L]
 P = Perímetro mojado [L]
 B = Ancho de superficie libre [L]
 i = Índice de posición espacial
 n = Índice de posición temporal
 N = Índice de posición espacial final
 $\Delta\tau$ = incremento de tiempo [T]
 $\Delta\xi$ = incremento en la coordenada adimensional
 Δs = Incremento en la coordenada espacial [L]

Referencias

- Aguilar, L. S. L., y Souza, F., "Algebraic Computation of Flow in Furrow Irrigation", *Journal of the Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, vol. 113, No. 3, Paper 21735, agosto, pp. 367-377, 1987.
- Aldama R. A., y Martínez A. P., "Esquema de Malla Adaptiva para Flujo Transitorio en Canales con Frontera Móvil", *X Congreso Nacional de Hidráulica*, México, octubre, pp. 251-271, 1988.
- Basset, D. L. "Mathematical Model of Water Advance in Border Irrigation", *Transactions American Society of Agricultural Engineers*, vol. 15, No. 5.1, pp. 992-995, 1972.
- Bishop, A. A., Walker, W. R., Allen, N. L., y Poole, G. J., "Furrow Advance Rates Under Surge Flow Systems" *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, ASCE, vol. 107, No. IR3, Proc. Paper 16502, sept., pp. 257-264, 1981.
- Chen, C. L. "Surface Irrigation Using Kinematic-Wave Method", *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, ASCE, vol. 96, No. IR1, Proc. Paper 7134, mar. 1970, pp. 39-46, 1970.
- Elliot, R. L., y Walker, W. R., "Field Evaluation of Furrow Infiltration and Advance Functions", *Transactions American Society of Agricultural Engineers*, vol. 25, No. 2, pp. 396-400, 1982.
- Elliot, R. L., Walker, W. R., y Skogerboe, G. V., "Zero-Inertia Modeling of Furrow Irrigation Advance", *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, ASCE, vol. 108, No. IR3, Proc. Paper 17340, sep. 1982, pp. 179-195.
- García V. N., "Ecuaciones fundamentales para flujo unidimensional a superficie libre", Reporte interno del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México, 1989.
- Hernando, C. H., "Riego Intermitente o por Impulsos", *Revista de Ingeniería Civil del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas*, núm. 73, Madrid, España, ene.-mar., pp. 70-76, 1990.
- Izuno, T., y Podmore, H., "Kinematic Wave Model for Surge Irrigation Research in Furrows", *American Society of Agricultural Engineers*, vol. 28, julio-agosto, pp. 1145-1150, 1985.
- Jaynes, D. B., "Simple Model of Border Irrigation", *Journal of the Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, vol. 112, No. 2, may., pp. 172-184, 1986.
- Katopodes, N. D., y Strelkoff, T., "Hydrodynamics of Border Irrigation-Complete Model", *Journal and Irrigation and Drainage Division*, ASCE, vol. 103, No. IR3, Proc. Paper 13188, sept., pp. 309-324, 1977.
- Malano, H. M., "Comparison of the Infiltration Process Under Continuous and Surge Flow", tesis presentada en la Universidad del Estado de Utah en Logan como requisito para la obtención del grado de Master of Science.
- (Mohammad Rayej), and Wallender W. W., "Furrow Model with Specified Space Intervals", *Journal of the Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, vol. 113, No. 4, Paper 21963, nov., pp. 536-548, 1987.
- Schmitz, G., Haverkamp, R., y Palacios Vélez, O., "A Coupled Surface-Subsurface Model for Shallow Water Flow Over Initially Dry Soil", Presentado en un Congreso de la ASCE en Australia, agosto 1985.
- Schmitz, G., y Seus, G. J., "Analytical Model of Level Basin Irrigation", *Journal of the Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, vol. 115, No. 1, Paper 23195, febrero, pp. 78-95, 1989.
- Sherman, B., y Singh, V. P., "A Kinematic Model for Surface Irrigation: An Extension", *Water Resources Research*, vol. 18, No. 3, junio, pp. 659-667, 1982.
- Singh, P., y Chauhan, H. S., "Shape Factors in Irrigation Water Advance Equation", *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, ASCE, vol. 98, No. IR3, Proc. Paper 9212, sept., pp. 443-458, 1972.
- Singh, P. V., y Yu-Cheng He, "Muskingum Model For Furrow Irrigation", *Journal of the Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, vol. 114, No. 1, Paper 22196, febrero, pp. 89-103, 1988.
- Souza, F., "Non-linear Hydrodynamics Model of Furrow

Irrigation", tesis presentada a la Universidad de California, en Davis como parte de los requisitos para obtener el grado de Doctor of Philosophy, 1981.

Strelkoff, T., y Katopodes, N. D., "Border-Irrigation Hydraulics With Zero Inertia", *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, ASCE, vol. 102, No. IR3, Proc. Paper 13189, sept., pp. 325-342, 1977.

Turbak, S. A., y Morel-Seytoux, J. H., "Analytical Solutions for Surface Irrigation. I: Constant Infiltration Rate. II: Variable Infiltration Rate", *Journal of the Irrigation and*

Drainage Engineering, ASCE, vol. 114, No. 1, febrero, pp. 31-59, 1988.

Walker, W. R., y Allan S. Humpherys, "Kinematic-Wave Furrow Irrigation Model", *Journal of the Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, vol. 109, No. 4, Paper 18460, december, pp. 377-392, 1983.

Wilson, N. B., y Elliott, L. R., "Furrow Advance Using Simple Routing Models", *Journal of the Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, vol. 114, No. 1, Paper 22197, febrero, pp. 104-117, 1988.