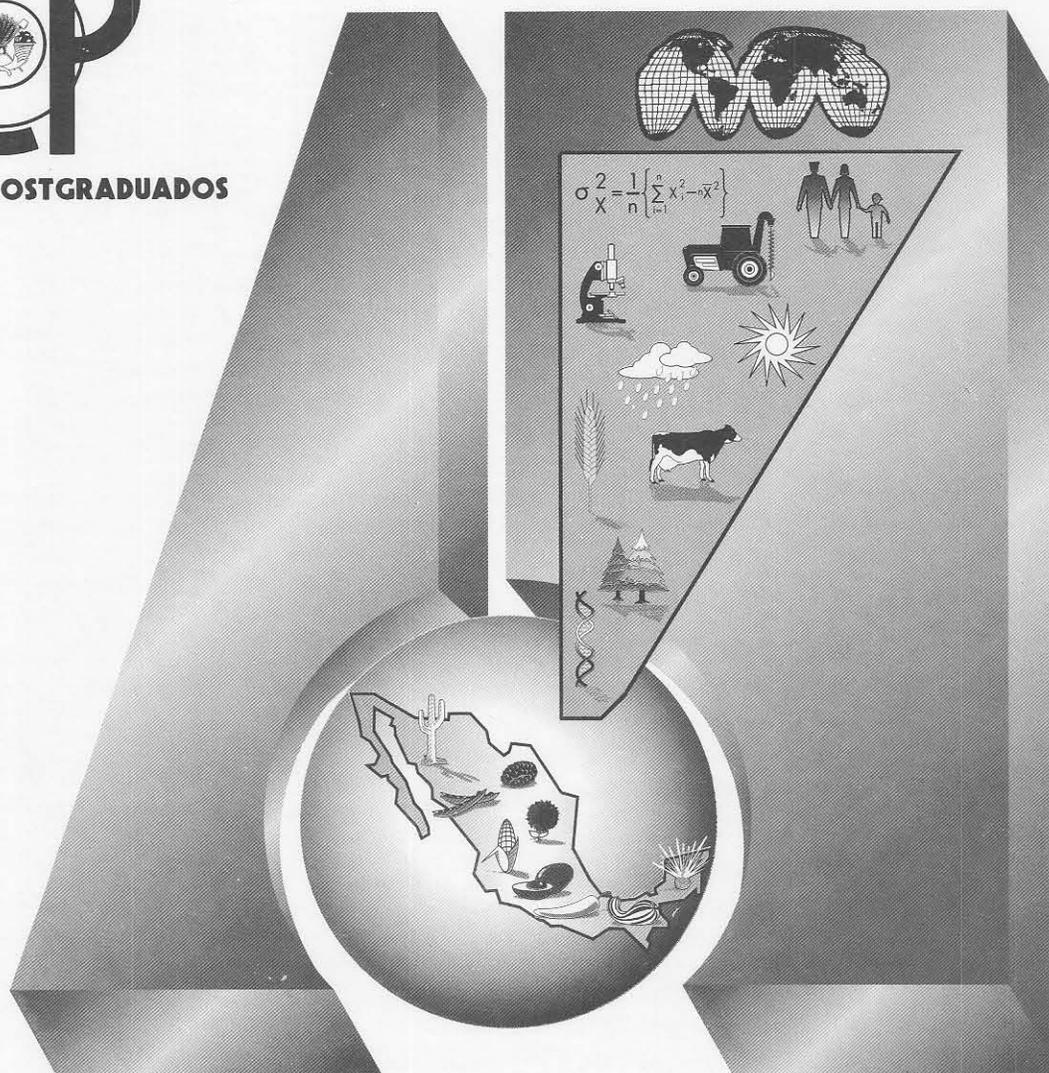




COLEGIO DE POSTGRADUADOS



Agrociencia

**DESARROLLO Y EVALUACION DE UN MODELO DE LA ONDA CINEMATICA
APLICADO AL RIEGO EN MELGAS Y SU COMPARACION CON
EL MODELO HIDROLOGICO**

Juan Manuel Angeles Hernández , Luis Rendón Pimentel , Oscar Palacios Vélez y Rafael Acosta Hernández

MEXICO

0000130

DESARROLLO Y EVALUACION DE UN MODELO DE LA ONDA CINEMATICA APLICADO AL RIEGO EN MELGAS Y SU COMPARACION CON EL MODELO HIDROLOGICO

DEVELOPMENT AND EVALUATION OF A KINEMATIC WAVE MODEL APPLIED TO BORDER IRRIGATION AND A COMPARISON WITH THE HYDROLOGIC MODEL

Juan Manuel Angeles Hernández¹, Luis Rendón Pimentel¹, Oscar Palacios Vélez² y Rafael Acosta Hernández²

RESUMEN

Durante la aplicación del agua de riego a los cultivos, en ciertos casos el agua debe suspenderse antes de que el frente de avance llegue al final de la melga, para así lograr una mejor eficiencia de aplicación. Esta situación del escurrimiento superficial se representa bien con la ecuación de la onda cinemática, que consiste en la simplificación de las ecuaciones de Saint-Venant. Se diseñó un programa de computadora que resuelve numéricamente la ecuación de la onda cinemática. El transporte del agua en el suelo se representó con la ecuación de infiltración propuesta por Green y Ampt. El modelo fue calibrado y evaluado con respecto a resultados de pruebas de riego aplicadas en un cultivo de trigo (*Triticum aestivum* L.). En la evaluación del modelo se obtuvo un cuadrado medio del error (CME) de 1.24 minutos para la fase de avance y de 0.68 minutos para la recesión. Al comparar el modelo hidrológico con los datos de campo, el CME fue de 0.86 y de 1.04 minutos para el modelo de la onda cinemática y el hidrológico, respectivamente.

Palabras clave: *Triticum aestivum* L., riego por melgas, onda cinemática, modelo hidrológico, irrigación.

ABSTRACT

During the irrigation of crops, sometimes the water must be cut off before it reaches the end of the border, in order to improve efficiency of the application. The surface flow can be represented with the kinematic wave model, which consists of a simplification of Saint Venant equations. A computer program was designed which solves numerically the kinematic wave equation. The subsurface water flow was modeled by the Green and

Ampt infiltration equation. The model was calibrated and evaluated by irrigation tests, which were carried out in a wheat (*Triticum aestivum* L.) field. As a result of the evaluation of the model an error mean square (EMS) of 1.24 minutes was obtained for the advancing phase and of 0.68 minutes for the receding phase. Comparing the hydrologic model with the field data, the EMS was 0.86 minutes for the kinematic wave model and 1.04 minutes for the hydrologic model.

Key words: *Triticum aestivum* L., border irrigation, kinematic wave model, hydrologic model, irrigation.

INTRODUCCION

Los sistemas de riego por gravedad en nuestro país ocupan 92 % de la superficie de riego pero son los de más baja eficiencia en el manejo del agua. Por lo tanto, es necesario aplicar opciones que mejoren esa eficiencia, entre las que destaca el hacer un buen diseño y manejo de las diferentes variables que intervienen en el riego.

Para diseñar y seleccionar las prácticas de manejo del riego por gravedad se han desarrollado modelos matemáticos para representar el riego por gravedad, que tienen la capacidad de analizar un amplia gama de condiciones de riego a bajo costo y en menos tiempo que en los experimentos de campo.

Ecuaciones de Saint-Venant en el riego por melgas

El escurrimiento superficial que se origina en el riego por melgas es un caso de flujo hidráulico no permanente y gradualmente variado; las ecuaciones que describen este tipo de flujo en canales son las que Barré de Saint-Venant presentó en 1871 (Arteaga, 1985).

1. Ecuación de conservación de la masa:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = -q(x, t) \quad (1a)$$

¹ Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532. Col. Progreso. 62550, Jiutepec, Morelos. México. Correo electrónico: jmhernan@riego.imta.mx

² Especialidad de Postgrado en Hidrociencias. IRENAT. Colegio de Postgraduados. 56230, Montecillo, Edo. de México.

Recibido: Sin información.

Aprobado: Enero, 1998.

Publicado como ARTICULO en Agrociencia 32: 21-28. 1998.

Para el caso del escurrimiento en una melga de ancho unitario, la ecuación anterior se expresa de la siguiente manera:

$$Y \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial Y}{\partial t} + \frac{\partial Y}{\partial t} = -q(x, t) \quad (1b)$$

2. Ecuación dinámica:

$$\frac{1}{g} \left[\frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial Y}{\partial t} \right] + \frac{\partial Y}{\partial t} - q(x, t) \frac{V}{2gY} + S_f - S_o = 0 \quad (2)$$

En donde:

Q = Gasto ($m^3 s^{-1}$); A = Sección transversal del flujo (m^2); x = Distancia a lo largo de la melga (m); t = Tiempo (s); q = Velocidad de infiltración ($m s^{-1}$); Y = Tirante (m); V = Velocidad media del flujo en la sección transversal ($m s^{-1}$); g = Aceleración de la gravedad ($m s^{-2}$); S_f = Pendiente de fricción de la línea de energía, adimensional; y S_o = Pendiente longitudinal de la melga, adimensional.

La solución de las Ecuaciones 1b y 2 constituyen un grupo de modelos de flujo no permanente gradualmente variado llamados modelos completos (French, 1988), para cuya solución normalmente se recurre a esquemas numéricos que requieren de considerable tiempo de computadora, por lo que se han propuesto algunas formas más simples para describir a este tipo de flujo.

Modelos hidrodinámicos

Estos modelos resuelven simultáneamente las ecuaciones de Saint-Venant (1a y 2) y la lámina infiltrada se obtiene con la ayuda de alguna ecuación simplificada de la infiltración.

Modelo de la onda difusiva (cero inercia)

En este caso la simplificación consiste en eliminar los términos de inercia en la Ecuación 2, obteniéndose la siguiente expresión:

$$\frac{\partial Y}{\partial x} + S_f - S_o = 0 \quad (3)$$

El modelo de cero inercia resuelve simultáneamente las Ecuaciones 1 y 3.

Modelo de la onda cinemática

En este caso la simplificación consiste en despreñar, además de los términos de inercia, los términos de aceleración; obteniéndose la ecuación:

$$S_f = S_o \quad (4)$$

la cual establece la igualdad entre la pendiente de la línea de energía y la pendiente del terreno. Este criterio es aplicable para los escurrimientos en que la componente de peso es más importante que las componentes de inercia y aceleración, es decir, para gastos pequeños y pendientes suaves.

Este modelo ha sido utilizado, entre otros, por Junes (1985) y por Pimentel (1989) para simular el escurrimiento superficial en cauces, encontrándose que reproduce satisfactoriamente dicho fenómeno.

En el Programa de Hidrociencias del Colegio de Postgraduados se ha desarrollado y evaluado un modelo hidrológico para el diseño del riego por melgas (Calvo, 1989; Rendón *et al.*, 1990a), el cual predice el comportamiento del riego por melgas cuando cambia el gasto o el contenido de humedad inicial. En la práctica, en ciertos casos, el gasto debe cortarse antes de que el frente de avance llegue al extremo de la melga, mejorando así la eficiencia de aplicación. Cuando el gasto de riego se corta antes de que el frente de avance llegue al final de la melga, se presentan las fases de avance aguas abajo y de recesión aguas arriba, simultáneamente, lo cual no puede ser representada por los modelos hidrológicos. La ecuación del modelo de la onda cinemática teóricamente permite representar esta situación, por lo que se consideró conveniente desarrollar un modelo basado en la solución numérica de esta ecuación.

Con base en lo anterior se plantearon los siguientes objetivos: 1) Desarrollar y evaluar el modelo matemático de la onda cinemática para el riego en melgas, cuando la aplicación del agua se suspende antes de que el frente de avance alcance el final de la misma; y 2) Comparar el modelo de la onda cinemática con el modelo hidrológico desarrollado en el Programa de Hidrociencias, para la fase de avance del riego por melgas.

MATERIALES Y METODOS

Deducción de la relación Gasto-tirante normal

En la Ecuación 4, S_f puede ser determinada con alguna ecuación de fricción, ya sea de Manning o

de Chezy. En el caso de Manning, la velocidad del flujo del agua para una melga se define como:

$$V = \frac{1}{n} S_0^{1/2} Y^{2/3} = 0$$

donde n es el coeficiente de rugosidad de Manning ($m^{-1/3} s$).

Lo anterior es válido si se considera que el tirante de la melga resulta insignificante en comparación con el ancho de la misma. El gasto para un ancho unitario de melga queda definido por:

$$Q = \frac{1}{n} S_0^{1/2} Y^{5/3}$$

Esta última ecuación del gasto se puede escribir como:

$$Q = \alpha Y^\beta \tag{5}$$

La Ecuación 5 permite expresar el gasto como una función del tirante, en donde $\beta = 5/3$ y α depende de la rugosidad (n) y de la pendiente de la melga.

Desarrollo de la ecuación del modelo matemático de la onda cinemática

El principio de conservación de la masa establece que la masa que entra, menos la que sale en un volumen de control o celda por unidad de tiempo, es igual al cambio de almacenamiento de masa en dicho volumen. Por lo tanto, aplicado al riego por melgas y considerando un ancho unitario, se tiene la expresión:

$$V_e - V_s = \Delta V + \Delta V_z \tag{6}$$

donde: V_e = Volumen de agua que entra al volumen de control ($m^3 m^{-1}$); V_s = Volumen de agua que sale del volumen de control ($m^3 m^{-1}$); ΔV = Cambio en el volumen superficial dentro del volumen de control ($m^3 m^{-1}$); y ΔV_z = Cambio en el volumen infiltrado dentro del volumen de control ($m^3 m^{-1}$).

Al plantear la Ecuación 6 para un volumen elemental o celda interior, como la que se presenta en la Figura 1, expresando cada término en diferencias finitas y sustituyendo la relación que existe entre el gasto y el tirante normal, se obtiene la siguiente ecuación de la onda cinemática:

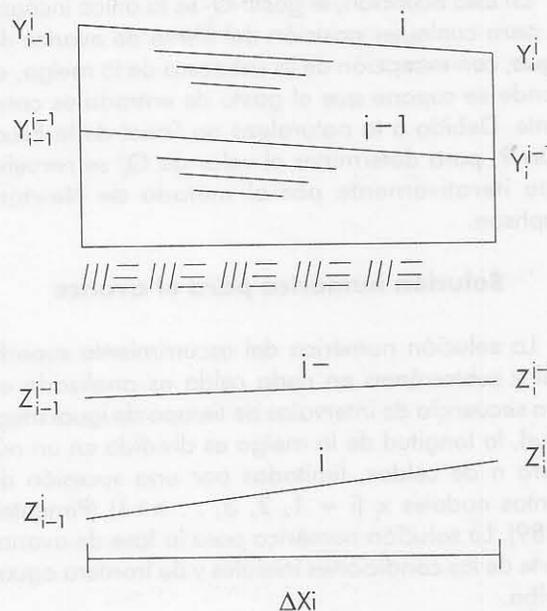


Figura 1. Propagación del perfil del flujo durante la fase de avance. Y=Tirante; Z=Lámina; i=Espacio; j=Tiempo; X=Longitud del tramo.

$$\begin{aligned} & [wQ_{i-1}^j + (1-w)Q_{i-1}^{j-1}] \Delta t - [wQ_i^j + (1-w)Q_i^{j-1}] \Delta t = \\ & \left(\frac{1}{\alpha}\right)^{1/\beta} \left\{ \left[\phi(Q_{i-1}^j)^{1/\beta} + (1-\phi)(Q_i^j)^{1/\beta} \right] \Delta x_i \right. \\ & \left. - \left[\phi(Q_{i-1}^{j-1})^{1/\beta} + (1-\phi)(Q_i^{j-1})^{1/\beta} \right] \Delta x_i \right\} \\ & + [\phi_z Z_{i-1}^j + (1-\phi_z)Z_i^j] \Delta x_i - [\phi_z Z_{i-1}^{j-1} + (1-\phi_z)Z_i^{j-1}] \Delta x_i \end{aligned} \tag{9}$$

donde: Q = Gasto que entra o que sale del volumen de control ($m^3 s^{-1}$); Δt = Intervalo de tiempo, constante (s); Y = Tirante (m); Z = Lámina infiltrada acumulada (m); Δx_i = Longitud variable de los tramos en que es analizado el frente de avance (m); i = Índice que corresponde al espacio; j = Índice que corresponde al tiempo; w = Coeficiente de ponderación en el tiempo, toma valores de 0 a 1; ϕ = Coeficiente de ponderación en el espacio del perfil superficial, con valores de 0 a 1; y ϕ_z = Coeficiente de ponderación en el espacio del perfil subterráneo, toma valores de 0 a 1.

En esta ecuación, el gasto Q_i es la única incógnita para cualquier posición del frente de avance del agua, con excepción de la cabecera de la melga, en donde se supone que el gasto de entrada es constante. Debido a la naturaleza no lineal de la Ecuación 9, para determinar el valor de Q_i se resuelve ésta iterativamente por el método de Newton-Raphson.

Solución numérica para el avance

La solución numérica del escurrimiento superficial y subterráneo en cada celda es analizada en una secuencia de intervalos de tiempo de igual magnitud, la longitud de la melga es dividida en un número n de celdas, limitadas por una sucesión de puntos nodales x_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n+1$) (Pimentel, 1989). La solución numérica para la fase de avance parte de las condiciones iniciales y de frontera aguas arriba.

Solución numérica para el avance y la recesión simultáneamente

Cuando la aplicación del agua de riego se suspende antes de que el frente de avance alcance el extremo final de la melga, es posible seguir calculando el avance y, además, la posición del frente de recesión mediante el modelo de la onda cinemática.

Cuando el frente de avance llega al final de la melga cerrada, no es posible seguir simulando la fase de recesión mediante el modelo de la onda cinemática, puesto que se necesita conocer la característica (valor de la variable ΔX_i) que se obtiene durante el avance del frente del agua, la cual permite solucionar la ecuación de conservación de la masa en el frente de recesión. Para tener completa la fase de recesión del riego por melgas, se utilizó un procedimiento empírico (Rendón *et al.*, 1990a) que permite seguir determinando la posición del frente de recesión hasta que concluye el riego.

Ecuación de infiltración de Green y Ampt

Para cuantificar la evolución de las láminas infiltradas se utilizó la ecuación de Green y Ampt (1911), ya que sus parámetros tienen interpretación física para describir el fenómeno de la infiltración, cuya ecuación simplificada es:

$$Z(t) = K_s t + \lambda \ln \left[1 + \frac{Z(t)}{\lambda} \right]$$

Con $\lambda = (h_1 - h_f)(\theta_s - \theta_o)$, donde: Z = Lámina infiltrada acumulada (cm); t = Tiempo de oportunidad de infiltración (h); K_s = Conductividad hidráulica a saturación natural (cm h^{-1}); h_1 = Tirante sobre la superficie del suelo (cm); h_f = Presión efectiva del agua en el frente de infiltración (cm); θ_s = Contenido de humedad a saturación ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); y θ_o = Contenido de humedad inicial ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

Las características hidrodinámicas del suelo, correspondientes a la parcela en donde se efectuaron las pruebas de riego, se encuentran en Calvo (1989) y Rendón *et al.* (1990a), pero dada la variabilidad espacial y temporal de cada uno de los parámetros, se optó por recopilar y utilizar la información básica de las pruebas de infiltración de Calvo (1989), en la cual se hicieron 22 pruebas de infiltración previas al riego de germinación y distribuidas cada 5 m a lo largo de la melga de 110 m.

En el Cuadro 1 se presentan los valores de los parámetros del suelo obtenidos a lo largo de la melga. Los parámetros de ajuste (h_g y m), del potencial de presión del agua en el frente de humedecimiento (h_i), del parámetro de la ecuación de Green y Ampt (λ) y de la conductividad hidráulica a saturación natural (K_s), se obtuvieron de acuerdo con la metodología mencionada por Rendón *et al.* (1990b). Nótese la variabilidad espacial existente entre los parámetros de infiltración del suelo. El coeficiente de variación de h_g , h_f , y K_s es muy alto; h_g y m son parámetros de ajuste, obtenidos mediante la ecuación de Van Genuchten (1980). Los demás parámetros ya han sido definidos anteriormente.

Pruebas de riego

Para evaluar el modelo de la onda cinemática, se hicieron pruebas de riego en trigo (*Triticum aestivum*) sembrado en melgas de 10 m de anchura por 110 m de longitud, en un lote de 59 x 110 m, del Campo de Enseñanza e Investigación del Programa de Hidrociencias del Colegio de Postgraduados, en Montecillo, Texcoco, Edo. de México.

Previo a la siembra se efectuaron las siguientes actividades: barbecho, rastreo y nivelación con equipo Land-Plane, proyectándose con una pendiente longitudinal de 0.19 % y nula en sentido transversal.

Antes y después de cada riego, se determinaba el contenido de humedad mediante el método gravimétrico; cada riego posterior al de germinación del trigo, se aplicó cuando la humedad aprovechable residual del suelo alcanzaba valores de 20, 70 y 40 % en la etapa vegetativa, reproductiva y de maduración, respectivamente; con estos valores generalmente se

Cuadro 1. Valores de los parámetros del suelo obtenidos a lo largo de la melga.

Contenido de humedad inicial θ_0 (cm ³ cm ⁻³)	Contenido de humedad a θ_s (cm ³ cm ⁻³)	Parámetro de ajuste h_g^\dagger (cm)	Presión en el frente de humedecimiento h_f^\dagger (cm)	Parámetro de ajuste m^\dagger (cm)	Parámetro de la ecuación de Green y Ampt λ^\dagger (cm)	Conductividad hidráulica a saturación natural K_s^\dagger (cm h ⁻¹)
0.20	0.46	0.002	5.6	0.1456	3.5	1.6
0.24	0.38	0.016	53.4	0.1135	8.8	1.3
0.32	0.43	0.093	286.5	0.1344	33.3	0.9
0.26	0.45	0.006	18.0	0.1359	4.9	1.6
0.21	0.44	0.011	33.3	0.1544	9.3	3.0
0.22	0.42	0.011	34.1	0.1524	8.7	2.9
0.23	0.39	0.013	39.8	0.1550	7.8	2.3
0.24	0.36	0.014	41.9	0.1524	6.2	2.7
0.24	0.36	0.014	41.9	0.1560	5.8	4.7
0.23	0.40	0.010	30.6	0.1459	6.5	2.4
0.24	0.41	0.011	35.3	0.1460	7.3	4.0
0.29	0.38	0.020	60.0	0.1388	6.3	2.8
0.22	0.40	0.002	5.7	0.1529	2.4	2.9
0.22	0.40	0.015	48.4	0.1436	10.1	2.6
0.26	0.41	0.165	525.0	0.1422	82.5	0.5
0.22	0.39	0.009	28.0	0.1450	6.2	3.9
0.26	0.41	0.017	53.2	0.1363	9.0	2.7
0.22	0.44	0.009	28.0	0.1418	8.0	1.4
0.21	0.38	0.018	55.7	0.1514	10.4	1.7
0.23	0.39	0.013	41.5	0.1488	7.9	1.4
0.22	0.37	0.030	91.8	0.1597	15.4	1.1
0.20	0.38	0.004	1.3	0.1508	1.6	0.2
Medias:						
0.24	0.40	0.022	70.9	0.1456	11.9	1.8
C.V. (%):						
11	7	157	160	7	139	50

[†] Calvo (1989).

han obtenido los máximos rendimientos en los trabajos de funciones de respuesta al contenido de humedad en el suelo en trigo (Castro, 1989).

El control del agua a la entrada de la melga se hizo con tuberías de compuertas distribuidas a lo largo de la cabecera del terreno; colocadas a nivel para garantizar el mismo caudal en cada compuerta. El gasto se determinaba mediante aforos volúmetricos de las mismas.

Para calibrar y evaluar el modelo se utilizaron las pruebas de riego efectuadas en la etapa de floración (espigamiento) del cultivo, en las cuales se presentó una mejor uniformidad en el frente de avance del agua. Para cuantificar la precisión del modelo se utilizó el cuadrado medio del error (CME).

El programa de cómputo CINEMATICA resuelve las ecuaciones planteadas en el desarrollo del modelo de la onda cinemática, para las fases de avance y de recesión; este programa fue desarrollado en lenguaje Turbo Pascal versión 6.0

RESULTADOS Y DISCUSION

La calibración del modelo se efectuó con los datos del sexto riego (Cuadro 2), en donde se ajustaron los siguientes parámetros:

Cuadro 2. Datos generales resultantes para la calibración del modelo.

Concepto	Valor
Gasto (L s ⁻¹)	26
Longitud (m)	110
Anchura (m)	10
Pendiente (%)	0.19
Coefficiente de Manning (s m ^{1/3})	0.039
Conductividad hidráulica a saturación natural K_s (cm h ⁻¹)	2.3
Parámetro h_f (cm)	50.000
Contenido de humedad $\theta_{saturación}$ (cm ³ cm ⁻³)	0.409
Contenido de humedad inicial $\theta_{inicial}$ (cm ³ cm ⁻³)	0.271
Parámetro m	0.1456
Parámetro H_g	0.01602
Tiempo de riego (minutos)	40

Coefficiente de rugosidad de Manning (n). Al inicio se adoptó un valor de n de 0.035, ya que representa un valor medio utilizado en riego por gravedad; sin embargo, el avance era sobreestimado, por lo que se aumentó a 0.039.

Potencial de presión (h_f). Inicialmente se adoptó el valor medio de 70.9 obtenido del Cuadro 1. Como este valor subestimó el avance, finalmente se encontró un valor de 50.0.

0000103

Conductividad hidráulica a saturación (K_s). Este valor fue ajustado de un valor inicial ($K_s = 1.887 \text{ cm h}^{-1}$) correspondiente a la media geométrica, puesto que la conductividad hidráulica sigue una distribución log normal (García, 1989), hasta un valor de 2.3 cm h^{-1} .

Fase de avance. En la simulación del avance para la sexta prueba de riego (Figura 2), se observa gran similitud entre los datos experimentales y los simulados. Al inicio y en la parte final (estación 90 y 100 m) se obtiene muy buena predicción, pero en la parte intermedia la predicción es menor; ahí se obtuvo un cuadrado medio del error (CME) de 0.745 minutos. Particularmente, la estación 110 es la que presenta una predicción menos precisa con un error relativo de 3.6 %, donde la diferencia del dato experimental con respecto al simulado fue de 1.7 minutos, el cual resultó poco significativo al calcular la lámina infiltrada acumulada en el riego por melgas.

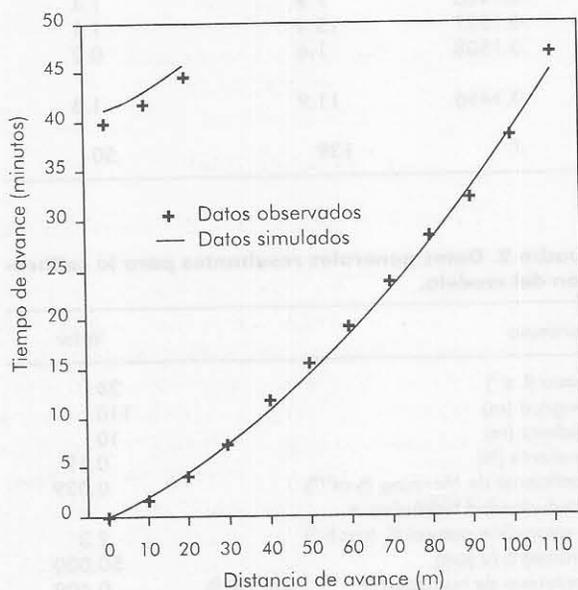


Figura 2. Calibración del modelo. (Avance y recesión).

Fase de avance y de recesión simultáneamente. Al suspender la aplicación del agua (Figura 2, parte superior izquierda) el frente de recesión observado resultó muy cercano al simulado, con un CME de 1.01 minutos.

Evaluación del modelo

Para evaluar la capacidad predictiva del modelo, se simuló el avance y la recesión para el séptimo riego. El procedimiento consistió en dejar fijos los

parámetros resultantes en la calibración y variar el gasto (24 L s^{-1}), el tiempo de riego (45 minutos) y el contenido de humedad inicial ($0.259 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). Al cambiar el contenido de humedad inicial, el parámetro del potencial de presión del frente de humedecimiento (h_f) también varió, por lo que su valor se recalculó, obteniéndose 50.5 cm. En el Cuadro 3 se muestran los datos generales utilizados en la evaluación del modelo.

Cuadro 3. Datos generales para la evaluación del modelo.

Concepto	Valor
Gasto (L s^{-1})	24
Longitud (m)	110
Anchura (m)	10
Pendiente (%)	0.19
Coefficiente de Manning ($\text{s m}^{1/3}$)	0.039
Conductividad hidráulica a saturación natural K_s (cm h^{-1})	2.3
Parámetro h_f (cm)	50.5
Contenido de humedad $\theta_{\text{saturación}}$ ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)	0.409
Contenido de humedad inicial θ_{inicial} ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)	0.259
Parámetro m	0.1456
Parámetro hg	0.01602
Tiempo de riego (minutos)	45

Fase de avance. En la Figura 3 se puede apreciar en general un buen ajuste de los datos de campo con los datos simulados ($n = 0.039$). Para las estaciones 40, 50, 60, 70 y 80 se observa una pequeña diferencia, obteniéndose un CME de 1.24 minutos. Lo anterior se atribuye a que entre el riego de calibración y el

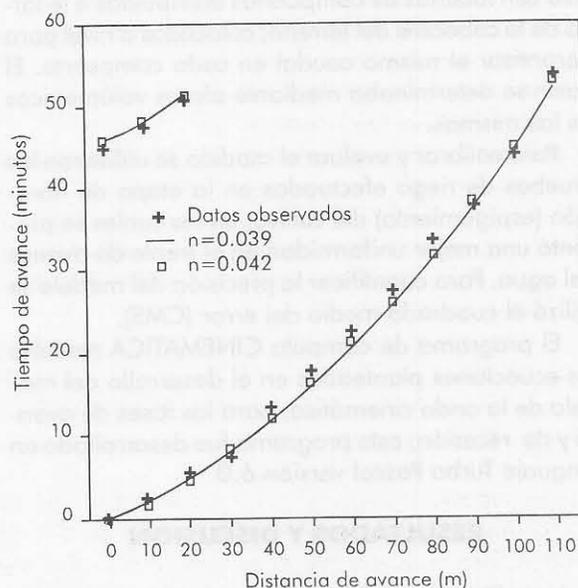


Figura 3. Evaluación del modelo. (Avance y recesión).

riego de evaluación transcurrieron 15 días por lo que el trigo se desarrolló más y en consecuencia el avance del agua resultó más lento, tal y como lo muestran los datos observados. Con el fin de constatar lo mencionado, se hizo una simulación adicional, incrementando el coeficiente de rugosidad ($n = 0.042$), obteniéndose un menor CME (0.86 minutos).

Fase de avance y de recesión simultáneamente. Se calculó un CME para la recesión de 0.68 ($n = 0.039$) y 0.52 ($n = 0.042$).

Los resultados de la calibración y evaluación de la fase de avance y de recesión indican que estas fases se representan muy bien con el modelo de la onda cinemática, ya que el CME resultó pequeño y para un coeficiente de rugosidad (n) de 0.039 el error relativo máximo de la evaluación del modelo fue de 5.9%; sin embargo, al considerar $n = 0.042$, el error relativo disminuyó a 4.6%. Cabe destacar que de acuerdo con la metodología desarrollada para la recesión, se determinó que una vez que el tirante en el frente de recesión se reducía en 20% del tirante normal, se consideraba en ese instante que el frente de recesión se localizaba en la estación correspondiente.

Comparación con el modelo hidrológico

A pesar de las diferentes suposiciones hechas en la simplificación de las ecuaciones de Saint-Venant que dan origen a cada uno de los modelos de la onda cinemática y al modelo hidrológico, aunado a las diferencias en la resolución matemática de cada modelo, se considera que prácticamente no hay diferencias en los resultados obtenidos en la fase de avance simulada mediante el modelo de la onda cinemática y el modelo hidrológico.

Para verificar la eficiencia del modelo de la onda cinemática en la predicción de la fase de avance en el riego por melgas y constatar lo mencionado en el párrafo anterior, se ejecutaron simulaciones de esa fase mediante el modelo de la onda cinemática y el modelo hidrológico desarrollado por Rendón *et al.* (1990b). En la Figura 4 se observa que en general ambos modelos tienen un comportamiento similar, obteniéndose un CME de 0.86 minutos para el modelo de la onda cinemática y de 1.04 minutos para el modelo hidrológico.

Con base en lo anterior, se constata que a pesar de la suposición teórica correspondiente al tipo de flujo involucrado en cada modelo, o sea, el flujo supercrítico en el modelo de la onda cinemática y el tirante constante considerado dentro del modelo hidrológico, no existen diferencias significativas en

la evolución del frente de avance del riego por melgas predichos por ambos modelos.

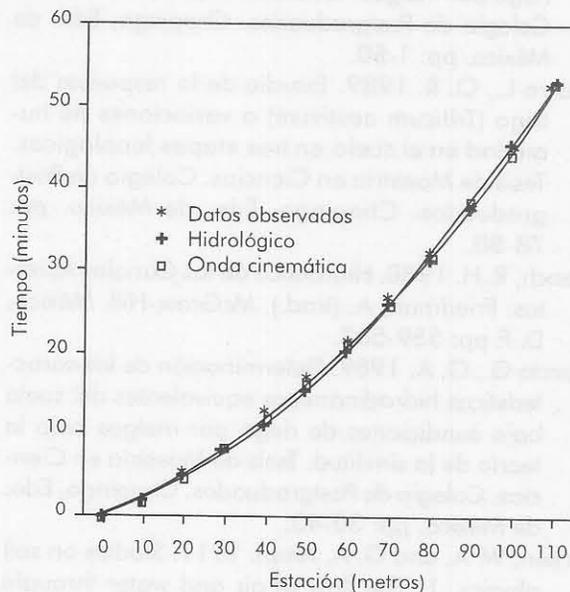


Figura 4. Comparación de los modelos. (Curvas de avance).

CONCLUSIONES

El modelo matemático de la onda cinemática que describe el escurrimiento superficial permite simular con buena precisión las fases de avance y de recesión, cuando la aplicación del gasto se suspende antes de que el frente de avance llegue al extremo de la melga. Las características propias de la ecuación de infiltración de Green y Ampt le confieren al modelo capacidad predictiva, ya que involucra los cambios en el contenido de humedad inicial del suelo. La solución numérica del presente modelo, así como la aplicación del algoritmo de cálculo son relativamente sencillas, con base en la precisión de los resultados simulados, dada la complejidad de los modelos denominados completos. Las diferencias matemáticas entre el modelo de la onda cinemática y el modelo hidrológico, debido a las suposiciones en la obtención de cada modelo, no afectan la evolución del frente de avance en el riego por melgas.

LITERATURA CITADA

- Arteaga T., R. E. 1985. Resolución de las ecuaciones de Saint-Venant por los métodos de diferencias finitas y de las características. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Chapingo, Edo. de México. pp: 7-13.

Calvo G., L. R. 1989. Desarrollo, evaluación y aplicación al diseño de un modelo hidrológico para el riego por melgas. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Chapingo, Edo. de México. pp: 1-50.

Castro L., O. R. 1989. Estudio de la respuesta del trigo (*Triticum aestivum*) a variaciones de humedad en el suelo en tres etapas fenológicas. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Chapingo, Edo. de México. pp: 78-80.

French, R. H. 1988. Hidráulica de los Canales Abiertos. Friedman, A. (trad.). McGraw-Hill. México, D. F. pp: 559-563.

García G., O. A. 1989. Determinación de las características hidrodinámicas equivalentes del suelo bajo condiciones de riego por melgas bajo la teoría de la similitud. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Chapingo, Edo. de México. pp: 30-40.

Green, W. A. and G. A. Ampt. 1911. Studies on soil physics. 1. The flow of air and water through soil. *J. Agric. Sci.* 4:1-24.

Junes C., D. A. 1985. Modelo de simulación para predicción de escurrimientos superficiales. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Chapingo, Edo. de México. pp: 34-52.

Pimentel L., J. 1989. Modelo matemático para simular el escurrimiento de una red de cauces. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Chapingo, Edo. de México. pp: 1-22.

Rendón, P. L., R. C. Fuentes, G. R. L. Calvo, and H. R. Acosta. 1990a. A hydrologic model for designing border irrigation and Drainage Engineering. ASCE. Durango, Colorado. USA. pp: 1-2.

Rendón P., L., J. Ortiz R., y R. Acosta R. 1990b. Riego eficiente del trigo por melgas. In: Sobre el Análisis de la Problemática del Agua y Perspectivas Para la Modernización de su Uso en la Agricultura de Guanajuato. Celaya, Gto. México. pp: 157-170.

Van Genuchten, M. T. 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 44: 892-898.

CONCLUSIONES

El modelo hidrológico de la zona estudiada que describe el escurrimiento superficial permite simular con buena precisión los flujos de caudal y de agua que ocurren en la zona de estudio de acuerdo a datos de que el suelo de la zona de estudio de acuerdo a la teoría de la similitud. Los resultados obtenidos de la simulación con el modelo de Green y Ampt se compararon con los resultados obtenidos en el estudio de campo. Se concluye que el modelo de Green y Ampt es adecuado para simular el escurrimiento superficial de la zona estudiada. Los resultados obtenidos de la simulación con el modelo de Green y Ampt se compararon con los resultados obtenidos en el estudio de campo. Se concluye que el modelo de Green y Ampt es adecuado para simular el escurrimiento superficial de la zona estudiada.

LITERATURA CITADA

Ampt, G. A. and W. A. Green. 1911. Studies on soil physics. 1. The flow of air and water through soil. *J. Agric. Sci.* 4:1-24.

Comparación con el modelo hidrológico

A partir de los datos de campo se compararon los resultados de la simulación con el modelo hidrológico de la zona estudiada. Se concluye que el modelo hidrológico de la zona estudiada describe con buena precisión los flujos de caudal y de agua que ocurren en la zona de estudio de acuerdo a datos de que el suelo de la zona de estudio de acuerdo a la teoría de la similitud. Los resultados obtenidos de la simulación con el modelo de Green y Ampt se compararon con los resultados obtenidos en el estudio de campo. Se concluye que el modelo de Green y Ampt es adecuado para simular el escurrimiento superficial de la zona estudiada.