

**UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA**  
**“ANTONIO NARRO”**  
**UNIDAD LAGUNA**

**DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS**



**EVALUACIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA EL DISEÑO  
DE RIEGO POR SUPERFICIE.**

**POR:**

**GEBROHAM LÓPEZ HERNÁNDEZ**

**TESIS**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL**

**TÍTULO DE:**

**INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN**

**TORREÓN COAHUILA, MÉXICO**

**DICIEMBRE 2009.**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA  
"ANTONIO NARRO"  
UNIDAD LAGUNA**

**EVALUACIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA EL DISEÑO  
DE RIEGO POR SUPERFICIE.**

**TESIS PRESENTADA POR:**

**GEBROHAM LÓPEZ HERNÁNDEZ**

**ELABORADA BAJO LA SUPERVISIÓN DEL COMITÉ PARTICULAR DE  
ASESORÍA Y APROBADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL  
TÍTULO DE:**

**INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN**

**APROBADA POR:**

**ASESOR PRINCIPAL:**

  
M.C. CARLOS EFREN RAMÍREZ CONTRERAS

**ASESOR:**

  
M.C. MIGUEL RIVERA GONZÁLEZ

**ASESOR:**

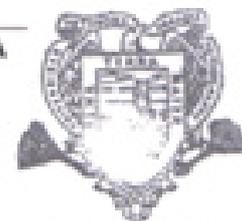
  
Ph.D. VICENTE DE PAUL ALVAREZ REYNA

**ASESOR:**

  
M.C. J. ISABEL MÁRQUEZ MENDOZA

  
M.C. VÍCTOR MARTÍNEZ CUETO

**COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS**



**Coordinación de la División  
de Carreras Agronómicas**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA  
"ANTONIO NARRO "  
UNIDAD LAGUNA**

**EVALUACIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA EL DISEÑO  
DE RIEGO POR SUPERFICIE.**

**TESIS PRESENTADA POR:**

**GEBROHAM LÓPEZ HERNÁNDEZ**

**QUE SE SOMETE A CONSIDERACIÓN DEL H. JURADO EXAMINADOR,  
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN**

**COMITÉ EVALUADOR:**

**PRESIDENTE:**

  
M.C. CARLOS ERREN RAMÍREZ CONTRERAS

**VOCAL:**

  
M.C. MIGUEL RIVERA GONZÁLEZ

**VOCAL:**

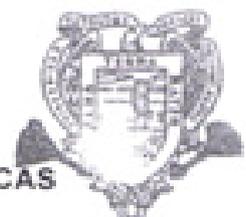
  
Ph. D. VICENTE DE PAUL ALVAREZ REYNA

**VOCAL:**

  
M.C. J. ISABEL MARQUEZ MENDOZA

  
M.C. VÍCTOR MARTÍNEZ CUETO

**COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS**



Coordinación de la División  
de Carreras Agronómicas

TORREÓN, COAHUILA, MEXICO

DICIEMBRE 2009

## RESUMEN.

En el presente trabajo, se realizaron seis pruebas de avance de riego. Los datos obtenidos en campo, se ajustaron a las características hidráulicas de cada predio en un programa de informática con diferentes modelos matemáticos utilizados en el diseño de sistemas de riego por superficie (hidrodinámico, cero inercia y onda cinemática)

El objetivo del presente trabajo fue obtener el mejor modelo matemático para el diseño de riego por superficie. Se realizó una comparación de las pruebas de avance para cada uno de los modelos matemáticos, (hidrodinámico, cero inercias, onda cinemática), en base a los datos de campo obtenidos en la evaluación de riego:

El modelo matemático hidrodinámico es el mejor para el diseño de riego por superficie, considerándose el más completo en el análisis de los parámetros que intervienen.

**Palabras claves:** Modelos matemáticos, hidrodinámico, cero inercia, onda cinemática, agua.

## CONTENIDO

<b>RESUMEN.</b>	i
<b>I. INTRODUCCIÓN.</b>	1
<b>II. OBJETIVO.</b>	3
<b>III. HIPÓTESIS.</b>	3
<b>IV. REVISIÓN DE LITERATURA.</b>	4
4.1 Riego por superficie	4
4.2 Diseño del sistema de riego	5
4.3 Programa Informático de simulación SIRMOD	6
4.4 Modelos de simulación hidráulica para riego por superficie	6
4.5 Modelo Hidrodinámico	7
4.6 Modelo Cero inercia	9
4.7 Modelo Onda Cinemática.	9
4.8 Modelo de Balance de Volumen.	10
<b>V. MATERIALES Y MÉTODOS.</b>	11
5.1 Pruebas de riego	11
5.2 Características físico-químicas del suelo.	12
5.3 Determinación de la pendiente y longitud de melga	12
5.4 Determinación de la humedad del suelo.	13
5.5 Tiempo de avance.	14
5.6 Infiltración del agua en el suelo.	14
5.7 Determinación del gasto aplicado.	15
5.8 Lamina de riego.	15
<b>VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.</b>	16
6.1 Comparación de modelos matemáticos en el predio San Ramiro.	16
6.2 Comparación de modelos matemáticos en el predio Santa Bárbara.	17
6.3 Comparación de modelos matemáticos en el predio P.P Santo Tomas beta San Gabriel melga No. 8	18
6.4 Comparación de modelos matemáticos en el predio P.P Santo Tomas beta San Gabriel melga No. 13	19
6.5 Comparación de modelos matemáticos en el predio P.P Santo Tomas beta San Gabriel melga No. 3	20

6.6 Comparación de modelos matemáticos en el predio P.P Santo Tomas beta San Gabriel melga No 14	21
<b>XII. CONCLUSIONES.</b>	22
<b>XIII. RECOMENDACIONES.</b>	22
<b>IX. BIBLIOGRAFÍA</b>	23
<b>X. APÉNDICE.</b>	26

## I. INTRODUCCIÓN.

El principal uso del agua en México es el agrícola, agua utilizada para el riego de cultivos. La superficie dedicada a labores agrícolas en México varía entre 20 y 25 millones de hectáreas, con una superficie cosechada de 18 a 22 millones de hectáreas por año.

México ocupa el sexto lugar mundial en términos de superficie con infraestructura bajo riego. Con 6 452 934 hectáreas, de las cuales 3 496 902 hectáreas que equivalen al 54%, corresponden a 85 Distritos de Riego, y 2 956 032 ha el 46 % corresponden a 39 492 mil unidades de Riego (CONAGUA, 2008).

La actividad agrícola es la que requiere más agua, sin embargo es la más ineficiente. Estudios realizado por el banco mundial en 1998 (Águila, 1998) se estima que la eficiencia promedio en uso de agua en la agricultura es de 30% a nivel mundial. En México se estima que la eficiencia de conducción en la red de canales es del orden de 64.7%, conducción interparcelaria 75% y la de aplicación en la parcela es de 70% resultando una eficiencia global de 34.9% Peña E. (IMTA, 2007).

Los sistemas de riego por gravedad operan con eficiencia de aplicación a nivel parcelario menor de 50%, reduciéndose así la superficie potencial regable, ocasionando que se sobreexploten los acuíferos del país (Aldama, 1998).

La superficie regada en México, por el método de melgas aproximadamente es de 92.7% que corresponden a 5 981 869 ha, con una eficiencia de 70% en aplicación a la parcela y un volumen total de 56 150 millones de m<sup>3</sup> (Morabito et al. 2008). Debido a ésta eficiencia el volumen total que se aprovecha es de 15 604 millones de m<sup>3</sup>. Esto es debido a que en algunos distritos de riego no se tiene un buen diseño del riego por superficie.

Actualmente se aprovecha un volumen de 15 604 millones de m<sup>3</sup>, con un buen diseño de riego por superficie se pueden rescatar 4 904 millones de m<sup>3</sup> lo que incrementaría la disponibilidad del agua a 20 508 millones de m<sup>3</sup>, si se incrementa la eficiencia de 70% a 92% en la aplicación parcelaria. El volumen recuperado permitiría regar 522 456.51 ha. Si en esta superficie se cultiva maíz, con un rendimiento de 10 ton/ha, la producción por obtener es de 5 224 565 toneladas, que en dinero equivale a \$754 845 165 dólares.

Actualmente existen disponibles métodos de simulación de riego por superficie, que permiten conocer el desarrollo de las diferentes fases del riego en corto tiempo y poca inversión, esto para aumentar la eficiencia de riego y producción, bajo cualquier condición de suelo y agua. Una herramienta habitual en el diseño y gestión de los sistemas de riego por superficie es la modelización matemática.

El desarrollo de modelos matemáticos que describen la realidad física y evolución de los métodos numéricos que permiten resolverlos satisfactoriamente, hacen que las simulaciones sean el complemento ideal a las técnicas experimentales. Esto es debido a la rapidez y versatilidad de los modelos. Además, la modelización en general es más accesible que la preparación de las instalaciones experimentales, resultando a su vez en una ventaja económica.

Un buen diseño elimina casi en su totalidad los encharcamientos durante la temporada de lluvia o mala irrigación, al tener una aplicación homogénea del agua se efficientizan todas las labores, reduce la mano de obra, ya que la cosecha es más homogénea por lo que se requiere menos mano de obra para (deshierbe, cosecha, etc.). Si el predio no está bien nivelado no se tiene la eficiencia requerida en la aplicación del agua.

Otra alternativa es utilizar otros sistemas tecnificados de riego, como sistemas de riego por goteo, microaspersión, pivote central, aspersión o bien diseñar adecuadamente los sistemas de riego por superficie.

La generación y refinamiento de técnicas es el aspecto en el que se han tenido los avances más importantes. Sin embargo, la transferencia y adopción de estas técnicas es la etapa donde han ocurrido los mayores rezagos.

## **II. OBJETIVO.**

- Seleccionar el mejor modelo matemático para el diseño de riego por superficie.

## **III. HIPÓTESIS.**

Los modelos matemáticos llamados hidrodinámico, cero inercia y onda cinemática, representan de igual manera el comportamiento del sistema de riego por superficie.

## IV. REVISIÓN DE LITERATURA.

### 4.1 Riego por superficie

Los sistemas de riego por superficie son los más usados en el mundo, siendo habitual que el rendimiento de estos sistemas sea del 40 al 60 por ciento o incluso menos (Kruse y Heermann, 1977). Los sistemas de riego por superficie que aplican de forma ideal el agua permiten rendimientos del orden de 70 a 85 por ciento (Merriam y Keller, 1978). Los bajos rendimientos obtenidos en los sistemas de riego por superficie se deben fundamentalmente a mal manejo del riego condicionado por una alta variabilidad espacial y temporal en cuanto a las características del suelo. Además de un conocimiento no exacto de las características de infiltración del suelo originan un mal manejo del riego y, por lo tanto, bajo rendimiento de aplicación. Las medidas directas de infiltración del suelo a través del infiltrómetro de doble anillo o a través del infiltrómetro de surco bloqueado pueden no representar de forma exacta la infiltración a lo largo del surco debido a la variabilidad espacial que puede existir en el suelo. En este sentido, las medidas de la infiltración a partir de los datos de avance (problema inverso) son más representativas de la infiltración real.

El riego superficial o gravedad consiste en la inundación controlada de la superficie del terreno la cual se divide en unidades de riego limitadas por bordos que restringen el flujo lateral del agua, sobresaliendo los métodos de riego por melga y surcos. Existen dos características generales que distinguen el riego por gravedad: a) el flujo del agua tiene una superficie libre que corresponde al gradiente gravitacional; b) la superficie del terreno sirve como medio de transporte y distribución del agua (FAO, 1974). En un evento de riego por gravedad se distingue cuatro fases.

- Avance: inicia con la aplicación del gasto y finaliza cuando el frente del agua alcanza el extremo final de la superficie del riego.

- Almacenamiento: inicia cuándo el frente de agua alcanza el extremo final de la superficie de riego y finaliza cuando cesa el gasto.
- Consumo: inicia cuando se suspende el gasto y finaliza cuando alguna parte de la superficie queda expuesta al aire; durante esta fase disminuye el almacenamiento por efecto de la infiltración o por escurrimiento.
- Recesión: se caracteriza por una exposición progresiva de la superficie de riego al aire; idealmente comienza cuando reaparece expuesta la superficie del suelo en el extremo inicial de la superficie de riego, continua hacia el extremo final de dicha superficie a medida que el agua se infiltra o escurre, y termina cuando el agua almacenada en el extremo final se absorbe completamente. (Walker, 1987).

## **4.2 Diseño del sistema de riego**

El diseño del sistema de riego por gravedad consiste en la selección de la longitud, ancho de melga o espaciamiento del surco, pendiente longitudinal, así como la dirección y gasto de riego, que permitan distribuir uniformemente la lámina de riego previamente calculada.

Los terrenos aptos para riego por melgas presentan dos pendientes, una de las cuales es muy pequeña o nula. La dirección del riego se selecciona haciéndola coincidir con la dirección de la máxima pendiente.

La pendiente longitudinal de la melga o surco se elige de acuerdo a la pendiente natural del terreno, modificarla implica aumentar el volumen de tierra por mover y por lo tanto, los costos de nivelación son mayores, además de que se aumenta la profundidad de corte, lo cual no es recomendable desde el punto de vista agronómico, ya que se elimina la capa fértil del suelo. El rango de pendiente recomendable en la práctica, es de 0.05% a 0.5%, y no influye significativamente en el diseño (Rendón).

En el diseño del sistema de riego por gravedad se pueden utilizar dos métodos: a) pruebas de riego y b) modelos matemáticos.

### **4.3 Programa Informático de simulación SIRMOD**

El modelo de simulación SIRMOD (Walker, et al 1987) fue creado por Utah State University en los Estado Unidos de Norteamérica. En el modelo se presentan tres opciones de solución de las ecuaciones de Saint-Venant (1981), siendo: el modelo de hidrodinámico total, de cero inercia y el de onda cinemática.

Este programa de cómputo utiliza la relación de Kostiakov-Lewis para describir la infiltración acumulada par el régimen de flujo continuo e intermitente, tal relación es.

$$Z = K\tau^a + f_0\tau$$

Donde:

$$k = \text{Constante empírica } [L^3T^{-a}T^{-1}]$$

$$a = \text{Exponente empírico [Adim]}$$

$$f_0 = \text{Velocidad de la infiltración básica } [L^3T^{-1}L^{-1}]$$

### **4.4 Modelos de simulación hidráulica para riego por superficie**

Dependiendo del grado de simplificación hecha a las ecuaciones iniciales básicas, hay esencialmente, cuatro grandes grupos de modelos disponibles que permiten simular el escurrimiento de agua sobre la superficie del suelo, que han

sido utilizados por varios investigadores. En orden decreciente de complejidad, son los siguientes: Hidrodinámico, Cero inercia, Onda cinemática y Balance volumétrico (ELLIOTT y WALKER, 1982; STRELKOFF y SOUZA, 1984; RAYEJ y WALLENDER, 1985; RAYEJ y EALLENDER, 1987; RAYEJ y WALLENDER, 1988; SMERDENSON et al., 1988; WALLENDER y RAYEJ, 1980; WALLENDER y YOKOKURA, 1991; SOARES, 1998).

#### 4.5 Modelo Hidrodinámico

El hidrodinámico es el más completo de los modelos existentes, ya que no hace simplificaciones y se basa en la solución de las ecuaciones 1 y 2 conocidas en el flujo de agua en canales abiertos como ecuaciones de Saint-Venant (CHOW, 1959, WALKER y SKOGERBOE, 1987).

$$\frac{\partial A}{\partial t} + A \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial Z}{\partial \tau} = 0 \quad \text{Ec. 1}$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} - S_0 + S_f - \frac{v}{gA} \frac{\partial Z}{\partial \tau} = 0 \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

A = área de sección transversal de escurrimiento, L<sup>2</sup>;

T = tiempo acumulado, T;

V = velocidad media de flujo, L/T;

x = distancia desde la entrada del surco, L;

Z = volumen infiltrado acumulado por unidad de longitud, L<sup>3</sup>/L;

t = tiempo de oportunidad de infiltración, T;

g = aceleración de gravedad, L/T<sup>2</sup>;

y = profundidad de flujo, L;

S<sub>0</sub> = Pendiente media longitudinal de flujo, L/L;

S<sub>f</sub> = pendiente de la línea de energía. L/L;

c' = constante numérica resultante de la derivación, en el uso del principio de la conservación de cantidad de movimiento o de energía, adimensional.

Las ecuaciones 1 y 2 corresponden respectivamente a las ecuaciones de conservación de la masa o continuidad y conservación de la energía o momentum; son de tipo diferencial parcial de primer orden, una dimensión, no lineal e hiperbólicas. WALKER y SKOGERBOE (1987) desarrollaron dos procedimientos para solucionar numéricamente estas ecuaciones utilizando el método de las características (BASSETT, 1972; KINCAID et. al., 1972; BASSETT y FITZSIMMONS, 1976; KATAPODES y STRELKOFF, 1977) y el método de integración eulereana (SOUZA, 1981). El método de las características, primero convierte las ecuaciones diferenciales parciales en ecuaciones diferenciales ordinarias, y como ambas ecuaciones deben ser resueltas simultáneamente para cada coordenada de tiempo y espacio, se asume que una solución simultánea puede ser obtenida por la combinación lineal de ambas ecuaciones. La integración eulereana, presentada por STRELKOFF Y KATAPODES (1977) es una aproximación numérica a las dos ecuaciones, basada en el concepto de volumen de control deformable, comprendido por celdas deformables individuales. Cuando la principal deformación ocurre en el inicio del sistema, las celdas avanzan a una cierta velocidad, y un análisis conocido como sistema LaGrangeano es utilizado para simular la fase de avance; si la principal deformación ocurre en el contorno del final, como en las fases de reposición y recesión, las celdas son estacionarias y el sistema es conocido como Eulereano.

Esta solución numérica presentada por STRELKOFF y KATAPODES (1977) consta de la integración de las ecuaciones de Saint-Venant sobre un plano  $x-t$ , expresando valores conocidos sobre la línea de tiempo  $t_{i-1}$ , y valores desconocidos sobre una línea de tiempo corriente,  $t_i$ . Esto conduce a un sistema de ecuaciones que pueden ser resueltas por alguna técnica de solución de matrices. En la simulación de una o más de las fases de riego por superficie, utilizando las ecuaciones de Saint-Venant, resulta una matriz de los coeficientes de tipo esparcido y en la forma de faja con cinco diagonales que normalmente se han resuelto con la ayuda de un algoritmo denominado Preissmann double-

sweep, de uso específico para este tipo de matriz, (J.A. Liggett y J. A. Cunge, en 1975, y presentado con detalles por WALKER y SKOGERBOE 1987).

#### 4.6 Modelo Cero inercia

A partir del modelo hidrodinámico STRELKOFF Y KATAPODES (1977) partieron de unas determinaciones para su simplificación, en la que en vista de los valores bajos de velocidad decidieron ignorar los términos de inercia, llegando así al modelo de Cero Inercia, descrito en las siguientes ecuaciones:

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} - S_0 + S_f - \frac{v}{gA} \frac{\partial Z}{\partial t} = 0 \quad \text{Ec. 3}$$

$$\frac{\partial y}{\partial x} - S_0 + S_f = 0 \quad \text{Ec. 4}$$

Las simplificaciones que llegan al modelo de Cero inercia fueron hechas inicialmente por STRELKOFF Y KATAPODES (1977) y posteriormente por CLEMMENS (1978), en las que consideraron que para valores del número de Froude menores a 0.2, los términos eliminados de la ecuación de la energía no comprometían la precisión. Estas suposiciones fueron luego comprobadas por los autores de forma experimental y comparando simulaciones hechas con el modelo hidrodinámico.

#### 4.7 Modelo Onda Cinemática.

El modelo denominado de Onda cinemática conserva la ecuación de continuidad, pero simplifica al máximo la de energía, llegando a la siguiente expresión:

$$S_0 = S_f \quad \text{Ec. 5}$$

Es necesario combinar las ecuaciones de continuidad y la de energía (Ec. 5) para lograr representar adecuadamente los procesos que se desarrollan en el riego por superficie. En el modelo de onda cinemática se parte del supuesto que el flujo es permanente y uniforme.

#### **4.8 Modelo de Balance de Volumen.**

Otro de los modelos de simulación de riego por superficie es el de Balance Volumétrico y corresponde al modelo más simple; ha sido descrito y utilizado por diferentes investigadores en la simulación del avance del riego por superficie y para resolver el problema inverso del riego por superficie (WALLENDER y RAYEJ, 1987; WALKER Y SKOGERBOE, 1987, y TAFUR et. al., 2000). El modelo expresa el balance de masa entre volúmenes de agua aplicado, almacenado en la superficie de flujo y el infiltrado durante la fase de avance. En esta forma el modelo establece que el volumen de agua aplicado es igual al volumen de agua en la superficie más el volumen de agua infiltrada. La expresión general del modelo aplicado a surcos o melgas sería:

$$V_{ap} = V_s + V_i \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

$V_{ap}$ : Volumen aplicado

$V_s$ : Volumen superficial

$V_i$ : Volumen infiltrado.

## V. MATERIALES Y MÉTODOS.

### 5.1 Pruebas de riego

Consistió en experimentos de campo donde las variables experimentales fueron el gasto de riego unitario, longitud de la melga o surco y tipo de suelo. En base a los resultados de los experimentos, para cada tipo de suelo se obtuvo una relación empírica en donde se representa la combinación gasto-unitario-longitud que permita aplicar uniformemente una cierta lamina de riego.

Se realizaron 6 pruebas de avance, en cada predio en estudio y las siguientes actividades:

- Caracterización física-química del suelo
- Pendiente
- Humedad del suelo
- Longitud de parcela (m).
- Lamina requerida (cm).
- Tiempo de avance (min).
- Infiltración del suelo (m).
- Gasto unitario (m).
- Tiempo corte (min).

Los materiales utilizados fueron.

- Computadora IBM
- Nivel fijo
- Cinta métrica (50m)
- Barrena tipo California
- Molinete digital.
- Programa de de informática SIRMOD III. Para poder obtener este software, estuvimos en comunicación vía Internet con el DR. Wynn R. Walker profesor de la Utah State University.

Una vez capturados los datos anteriores, los resultados obtenidos son los siguientes:

- ❖ Valores de los parámetros de entrada.
- ❖ Perfil de avance/recensión/infiltración.
- ❖ Hidrogramas de escorrentía.
- ❖ Eficiencia de aplicación ( $E_a$ ), requerimiento ( $E_r$ ) y uniformidad de distribución ( $UD$ ).

Utilizando el programa SIRMOD (Walker, et al 1987); con los resultados obtenidos de perfil de avance se evaluaron los tres tipos de modelos matemáticos (hidrodinámico, cero inercia, onda cinemática).

Se volverá a repetir los datos de entrada pero con diferente modelo matemático

## **5.2 Características físico-químicas del suelo.**

Se obtuvieron tres muestras de suelo en cada sitio muestreado a profundidades de suelo de 0-30, 30-60, y 90-120. Una vez obtenidas las muestras de suelo se formó una muestra compuesta para cada profundidad.

Las determinaciones físicas realizadas fueron las siguientes: textura, capacidad de campo (CC), punto de marchites permanente (PMP) y densidad de campo. Esta última se determinó utilizando el método de la barrena para toma de muestra inalterada; así como las características químicas de pH y conductividad eléctrica (CE).

## **5.3 Determinación de la pendiente y longitud de melga**

Una vez seleccionada la melga se midió el largo y ancho, se colocaron estacas a cada 20 metros, para formar estaciones a lo largo de la melga y

obtener las lecturas con un nivel fijo en cada estación, para calcular la pendiente promedio y su variación a lo largo de la melga mediante un regresión lineal. Lo largo y ancho de la parcela se midió con una cinta métrica de 50 m, con estaciones de 20 metros.

#### **5.4 Determinación de la humedad del suelo.**

Se tomaron muestras de suelo en cada predio a diferente profundidad previamente definidas antes y después del riego. Las muestras fueron tomadas utilizando barrenas las cuales fueron colocadas en botes de aluminio cerrados herméticamente, posteriormente se llevaron al laboratorio para determinar el peso de suelo húmedo. Una vez realizado lo anterior las muestras se metieron a secar a la estufa por 24 hrs., a una temperatura de 105° C, después de ese tiempo se obtiene el peso de suelo seco.

$$P_s = \frac{P_{sh} - P_{ss}}{P_{ss}} \times 100 \quad \text{o} \quad P_s = \frac{P_a}{P_{ss}} \times 100$$

Donde:

$P_s$  = Contenido de humedad en peso de suelo seco %

$P_{ss}$  = Peso de suelo seco gr.

$P_{sh}$  = Peso de suelo húmedo gr.

$P_a$  = Peso de agua gr.

### **5.5 Tiempo de avance.**

Utilizando un cronometro se registro el tiempo en el instante que se abrió la regadera sobre la melga a regar (tiempo inicio), después se tomaron los tiempos que tardo el agua en llegar a cada estación (20m), hasta la última estación. Finalmente se registro el tiempo de corte. El tiempo de avance es hasta que el agua llegó al final de la melga.

### **5.6 Infiltración del agua en el suelo.**

La medición de infiltración del agua en el suelo, se realizo mediante el método del doble cilindro, que consiste en utilizar un par de estructuras metálicas en forma de tubo con diferentes diámetros que puede variar de 40 a 60 cm de largo y 30 cm de diámetro. Estos deben ser lo suficientemente resistentes para que penetren en el suelo en forma concéntrica, así mismo los cilindros son introducidos en el suelo a una profundidad de 15 cm. La prueba debe realizarse en lugares representativos de área a estudiar.

Una vez instalado, el inicio de la prueba consistió en aplicar agua en el espacio formado por los dos cilindros con el propósito de evitar el movimiento lateral del agua contenida en el cilindro interior, esto es importante ya que se pueden hacer lecturas de la carga de agua que no corresponden a las reales lo que afecta la prueba. Posteriormente se agrega agua el cilindro interior procurando que la lamina de agua no exceda la carga esperada durante un riego normal que varía de 10 a 20 cm, en ese momento se procede a la toma de datos como es la profundidad de la lamina de agua desde el borde superior del cilindro interior al espejo del agua en dicho cilindro, así mismo es importante registrar la hora de inicio de la observación, durante este proceso se continua tomando tiempos a criterio repetidamente a intervalos cortos al inició (1min.). Después se continúa con espacios más grandes conforme avanza la prueba hasta alcanzar

la infiltraron básica del suelo, se recomienda elaborar un formato para la toma de datos.

### 5.7 Determinación del gasto aplicado.

El gasto aplicado se determinó utilizando el molinete digital para medir la velocidad, así como el área de la sección de riego.

$$Q = A * V$$

Donde:

V = Velocidad (m/s)

A = Área (m<sup>2</sup>)

### 5.8 Lamina de riego.

Es la cantidad o lámina de agua que requiere el cultivo para calcularla es necesario obtener los parámetros de humedad del suelo, densidad aparente y profundidad de radicular. Se calculó con la siguiente ecuación.

$$Lr = \left( \frac{P_{ss} - P_{sh}}{100} \right) * Da * Pr$$

Donde:

Lr = Lamina de riego (cm).

Pss = Peso del suelo seco (gr.)

Psh = Peso del suelo húmedo (gr.)

Da = Densidad aparente (gr. / cm<sup>3</sup>)

Pr = Profundidad radicular (cm)

## VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

### 6.1 Comparación de modelos matemáticos en el predio San Ramiro.

En la figura 1 se presenta el análisis de la prueba de avance para el predio San Ramiro, comparando el tiempo de avance cada 20 metros en campo con los simulados con el software SIRMOD III con los diferentes modelos (Hidrodinámico, Cero inercia y Onda Cinemática). En la figura podemos observar que el modelo que mejor se acerca a los datos reales (campo) es el modelo de Onda Cinemática. Los modelos Hidrodinámicos y Cero inercia predicen con menor precisión, no existiendo mucha diferencia entre estos dos modelos al simular la prueba de avance.

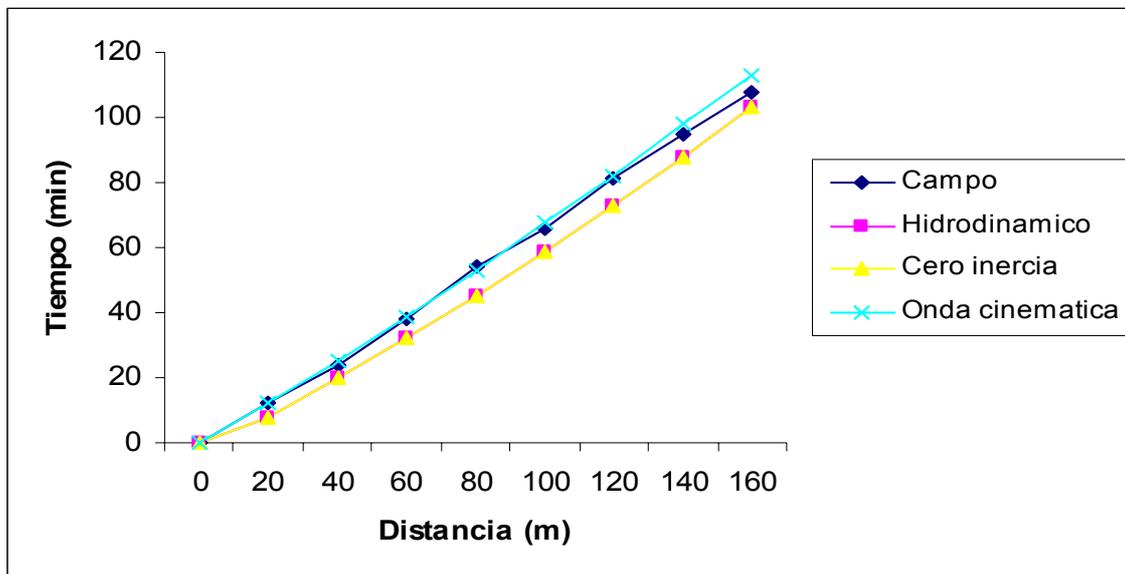


Figura 1. Comparación de modelos matemáticos en el predio San Ramiro.

## 6.2 Comparación de modelos matemáticos en el predio Santa Bárbara.

En la figura 2 se presenta el análisis de la prueba de avance para el predio Santa Bárbara, comparando el tiempo de avance cada 20 metros en campo con los simulados con el software SIRMOD III con los diferentes modelos (Hidrodinámico, Cero inercia y Onda Cinemática). En la figura podemos observar que el modelo que mejor se acerca a los datos reales (campo) es el modelo Onda Cinemática. Los modelos Hidrodinámicos y Cero inercia predijeron con menor precisión, no existiendo mucha diferencia entre ellos al simular la prueba de avance.

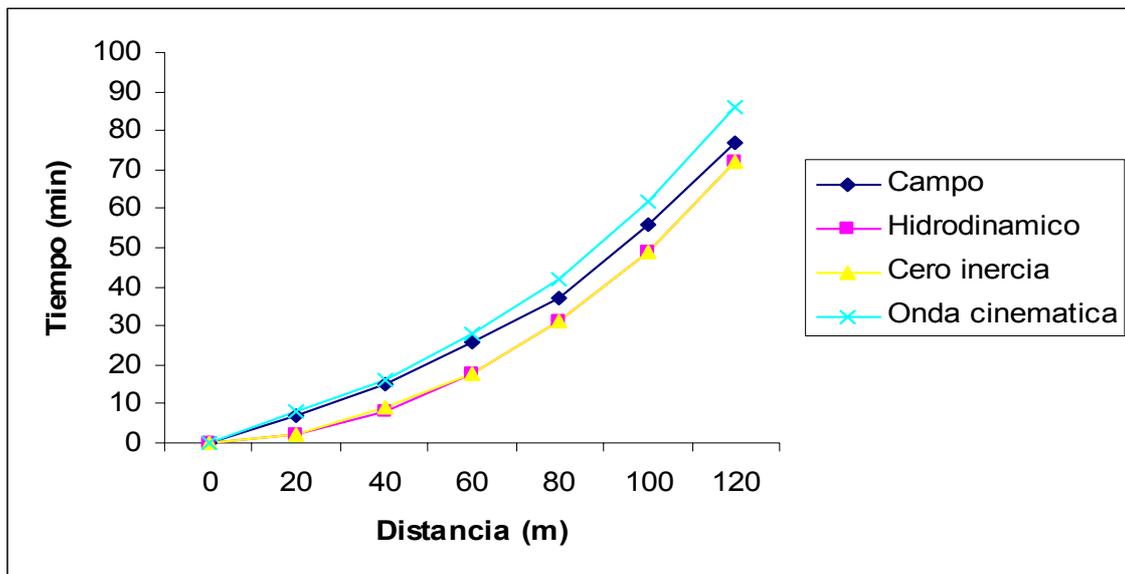


Figura 2. Comparación de modelos matemáticos en el predio Santa Bárbara.

### 6.3 Comparación de modelos matemáticos en el predio P.P Santo Tomas beta San Gabriel melga No. 8

En la figura 3 se presenta el análisis de la prueba de avance para el predio San Gabriel melga No.8, comparando el tiempo de avance cada 20 metros en campo con los simulados con el software SIRMOD III con los diferentes modelos (Hidrodinámico, Cero inercia y Onda Cinemática). En la figura podemos observar que el modelo que mejor se acerca a los datos reales (campo) es el simulado con el modelo Hidrodinámico y Cero inercia: El modelo Onda cinemática en este predio predijo con menor precisión la prueba de avance.

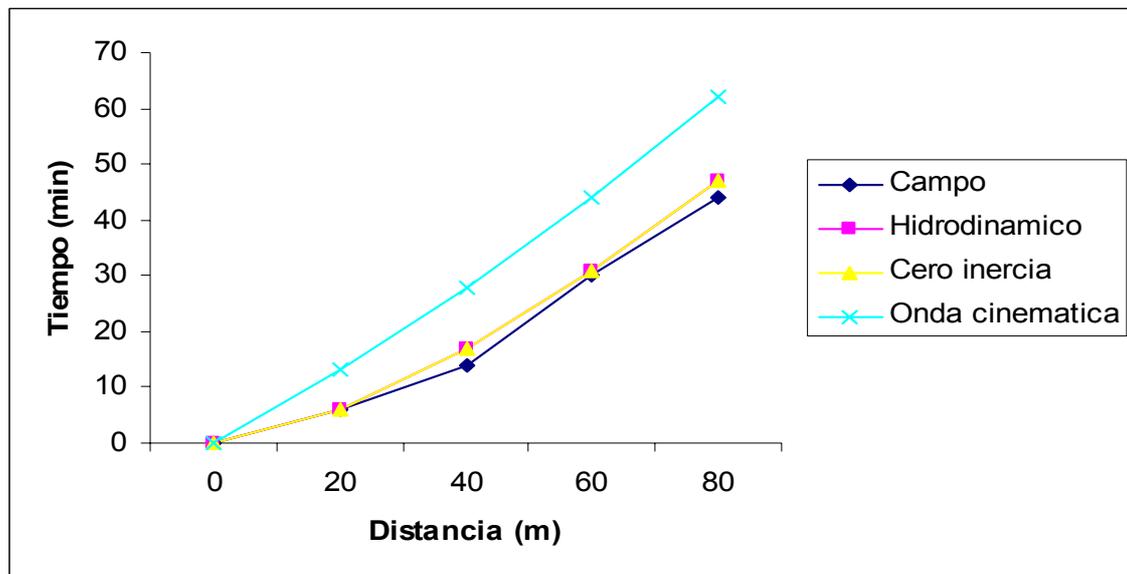


Figura 3. Comparación de modelos matemáticos en el predio P.P Santo Tomas beta San Gabriel melga No. 8.

#### 6.4 Comparación de modelos matemáticos en el predio P.P Santo Tomas beta San Gabriel melga No. 13

En la figura 4 se presenta el análisis de la prueba de avance para el predio San Gabriel melga No.13, comparando el tiempo de avance cada 20 metros en campo con los simulados con el software SIRMOD III con los diferentes modelos ( Hidrodinámico, Cero inercia y Onda Cinemática). En la figura podemos observar que el modelo que mejor se acerca a los datos reales (campo) es el simulado con el modelo Hidrodinámico y Cero inercia. El modelo Onda cinemática en este predio sobreestimo la prueba de avance.

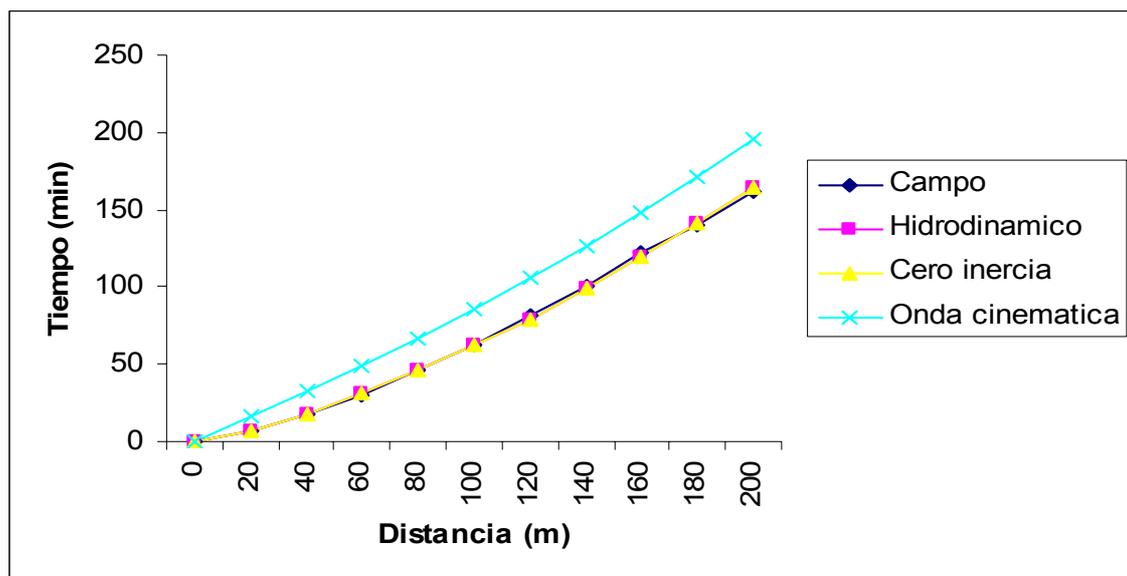


Figura 4. Comparación de modelos matemáticos en el predio P.P Santo Tomas beta San Gabriel melga No. 13

### 6.5 Comparación de modelos matemáticos en el predio P.P Santo Tomas beta San Gabriel melga No. 3

En la figura 5 se presenta el análisis de la prueba de avance para el predio San Gabriel melga No.3, comparando el tiempo de avance cada 20 metros en campo con los simulados con el software SIRMOD III con los diferentes modelos ( Hidrodinámico, Cero inercia y Onda Cinemática). En la figura 5 podemos observar que el modelo que mejor se acerca a los datos reales (campo) es el simulado con el modelo Hidrodinámico y Cero inercia. El modelo Onda cinemática en este predio sobreestimo la prueba de avance realizada en campo.

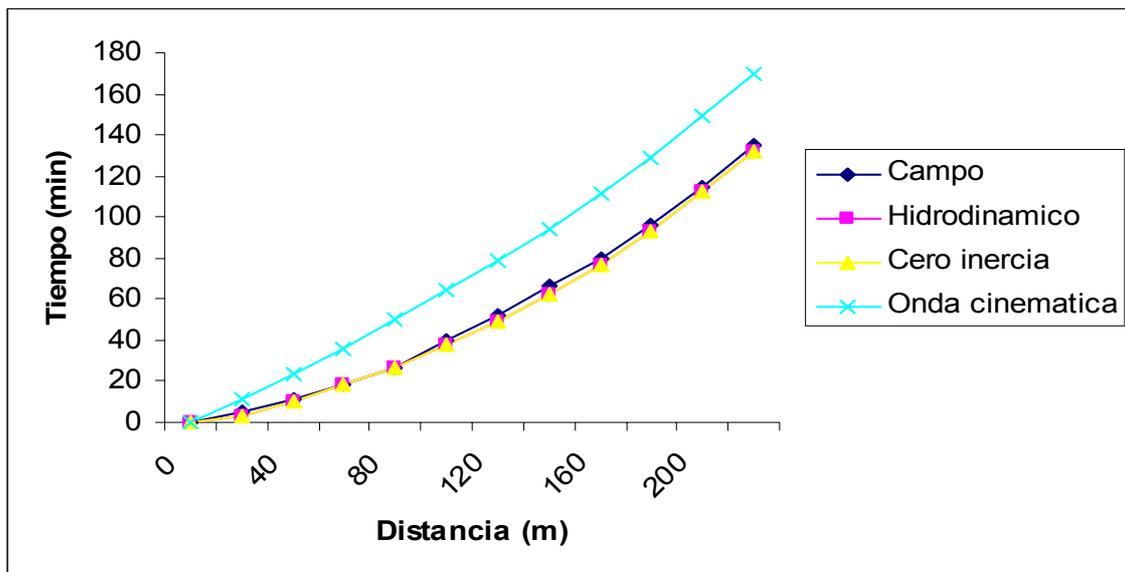


Figura 5. Comparación de modelos matemáticos en el predio P.P Santo Tomas beta San Gabriel melga No. 3

## 6.6 Comparación de modelos matemáticos en el predio P.P Santo Tomas beta San Gabriel melga No 14

En la figura 6 se presenta el análisis de la prueba de avance para el predio San Gabriel melga No.14, comparando el tiempo de avance cada 20 metros en campo con los simulados con el software SIRMOD III con los diferentes modelos ( Hidrodinámico, Cero inercia y Onda Cinemática). En la figura 6 podemos observar que el modelo que mejor se acerca a los datos reales (campo) es el modelo Hidrodinámico y Cero inercia, El modelo Onda cinemática en este predio sobreestimo la prueba de avance realizada en campo.

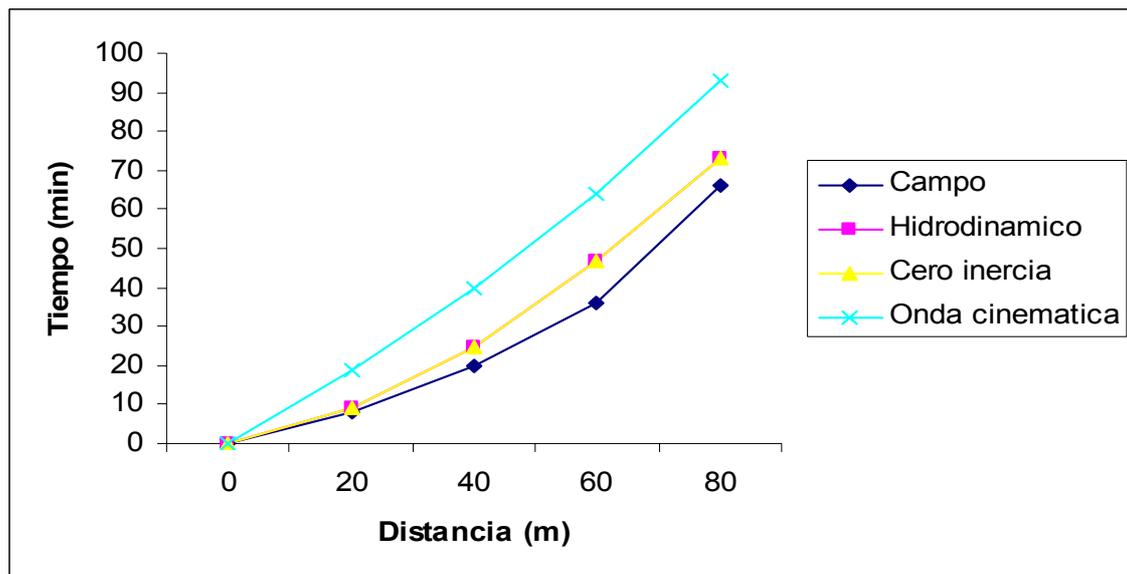


Figura 6. Comparación de modelos matemáticos en el predio P.P Santo Tomas beta San Gabriel melga No. 14

## **XII. CONCLUSIONES.**

En base a las condiciones bajo las cuales se realizó el presente trabajo podemos concluir:

El modelo matemático hidrodinámico es el mejor para el diseño de riego por superficie, considerándose el más completo en el análisis de los parámetros que intervienen.

## **XIII. RECOMENDACIONES.**

Es recomendable ajustar el programa informático SIRMOD con el modelo hidrodinámico.

Realizar trabajos posteriores donde se realice un análisis con varias repeticiones en el mismo predio a evaluar.

Nivelar adecuadamente el predio ya que esto afecta considerablemente la eficiencia de aplicación.

## IX. BIBLIOGRAFÍA

Águila, F. 1997. Alternativa tecnológica y organizacional para mejorar la eficiencia en el uso del agua en la agricultura. Tesis de maestría en ciencias. Colegio de postgraduados, Montecillo, México.

Acosta L. G. 2008. Evaluación de programas de simulación para el diseño del riego por gravedad. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna .torreón Coahuila.

Catalán, V.E. 1998. Guías de Riego (caso región lagunera). CENID-RASPA-INIFAP

Conagua 2008. Estadística del agua en México. 1ra edición.

FAO.1974. Surface irrigation, by L.J Booher. Agricultural development paper 95. Rome. 160p.

García R. M. 2000. Análisis de escenario en riego por superficie en melgas basado en un modelo de simulación. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna. Torreón, Coahuila. Pág. 28-36.

[http://dyna.unalmed.edu.co/ver\\_articulo.php?id\\_articulo=AB150704&tipo=articulo&id=149](http://dyna.unalmed.edu.co/ver_articulo.php?id_articulo=AB150704&tipo=articulo&id=149)

<http://www.uaz.edu.mx/cippublicaciones/CD%20Jornadas%202000%20%202001/Ingenieria/TI06.htm>

<https://upcommons.upc.edu/revistes/bitstream/2099/2595/1/93article6.pdf>

<https://upcommons.upc.edu/revistes/bitstream/2099/3079/1/44article1.pdf>

- Katapodes, N. D y Strelkoff, T. 1997. Hydrodynamics of border irrigation complete model. In: journal of irrigation and drainage engineering, ASCE, 103 (IR3): 309-324
- Morabito J, Santana S, Hernandez R y Enciso A. 2008. Los regadíos en los países de América Latina; perspectivas de modernización y control de los impactos ambientales.
- Página de Internet.  
([http://ceer.isa.utl.pt/cyted/2008/guatemala/cursos/Curso2\\_Morabito-Enciso.pdf](http://ceer.isa.utl.pt/cyted/2008/guatemala/cursos/Curso2_Morabito-Enciso.pdf))
- Manual de Riego. 1990. Ed Agropromizdat, Moscú, URRS, pp.27-44 (en Ruso)
- Palacios, V. E. 1990. La eficiencia de en el uso del agua en los distritos de riego. Memoria: análisis de la problemática del agua y perspectiva para la modernización de su uso en la agricultura de Guanajuato, Celaya, Gto., México.
- Peña, E. (IMTA, 2007) Eficiencias del uso del agua en distritos de riego en México.
- Ramírez, H. E. 2002. Análisis de escenarios basados en un modelo de simulación para el diseño de un sistema de riego por superficie. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna. Torreón, Coahuila. Pág. 20-34
- Rendón. Diseño simplificado de riego por gravedad. Instituto mexicano de tecnología del agua. Jiutepec Morelos, México
- Santiago, A.G., 2005. Variación espacial del consumo de agua del cultivo del nogal pecanero (*carya illinoensis koch*) en el distrito de riego 017 d la

- comarca lagunera. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna .torreón Coahuila. Pág. 1 y 5
- Servin, P.M., 2007. Programa para calcular demandas de agua y calendarizar el riego de los cultivos. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna .torreón Coahuila.
- SOUZA, F. 1997. Nonlinear Hydrodynamic model of furrow irrigation. (PH.D Dissertation). Davis, University of the California. STRELKOFF Y KATAPODES.
- STRELKOFF, T. Y KATAPODES, N. D. 1997. Border irrigation hydraulics whit zero inertia. In: journal of irrigation and drainage engineering, ASCE, 103 (3): 325-342)
- W.R walker. 1986. SIRMOD. Software for the hydraulics of overland flow analysis based on kinematic-wave, zero inertia, of full hydrodynamic. Biological and irrigation engineering. Utah state university
- Walker, W.R y Skogerboe, G.V. 1987. Surface irrigation: theory and practice. New Jersey: prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, 386p
- Wallender, W.W. Y Rayej, M. 1987. Economic optimization of furrow irrigation whit uniform and non-uniform soil. In: transaction of the ASAE, 30 (5): 1425-1429
- Wynn R Walker, Gaylord V. Skogerboe. 1987. Surface irrigation theory and practice. Utah State University.

# **X. APÉNDICE.**

Cuadro 1. Tiempo de avance del predio San Ramiro datos de campo y datos simulados con los diferentes modelos.

<b>Campo</b>		<b>Hidrodinámico</b>		<b>Cero Inercia</b>		<b>Onda Cinemática</b>	
Estación (m)	T. de avance (min.)	Estación (m)	T. de avance (min.)	Estación (m)	T. de avance (min.)	Estación (m)	T. de avance (min.)
0	0	0	0	0	0	0	0
20	12	19.5	8	19.5	8	20.1	12
40	24	40.8	20	40.8	20	39.9	25
60	38	60.2	32	60.2	32	60.3	39
80	54	80	45	80	45	80	53
100	66	100.4	59	100.4	59	100.6	68
120	81	120.1	73	120.1	73	119.4	82
140	95	140.6	88	140.6	88	140.4	98
160	108	160.6	103	160.6	103	159.8	113
193	128						
200							

Cuadro 2. Tiempo de avance del predio Santa Bárbara datos de campo y datos simulados con los diferentes modelos.

<b>Campo</b>		<b>Hidrodinámico</b>		<b>Cero inercia</b>		<b>Onda Cinemática</b>	
Estación (m)	T. de avance (min.)	Estación (m)	T. de avance (min.)	Estación (m)	T. de avance (min.)	Estación (m)	T. de avance (min.)
0	0	0	0	0	0	0	0
20	7	21.2	2	21.2	2	22.2	8
40	15	39.3	8	41.7	9	39.9	16
60	26	60.5	18	60.5	18	60.6	28
80	37	80	31	79.9	31	79.3	42
100	56	100.1	49	100	49	100.1	62
120	77	119.9	72	119.8	72	119.7	86
132	89						
160							

Cuadro 3. Tiempo de avance del predio P.P. Santo Tomas Beta San Gabriel melga No.8 datos de campo y datos simulados con los diferentes modelos.

<b>Campo</b>		<b>Hidrodinámico</b>		<b>Cero Inercia</b>		<b>Onda Cinemática</b>	
Estación (m)	T. de avance (min.)	Estación (m)	T. de avance (min.)	Estación (m)	T. de avance (min.)	Estación (m)	T. de avance (min.)
0	0	0	0	0	0	0	0
20	6	19.4	6	19.4	6	19.7	13
40	14	39.8	17	39.8	17	40.3	28
60	30	60.3	31	60.3	31	60.2	44
80	44	79.9	47	79.9	47	80.3	62
101.5	68						

Cuadro 4. Tiempo de avance del predio P.P. Santo Tomas beta San Gabriel melga No.13 datos de campo y datos simulados con los diferentes modelos.

<b>Campo</b>		<b>Hidrodinámico</b>		<b>Cero Inercia</b>		<b>Onda Cinemática</b>	
Estación (m)	T. de avance (min.)	Estación (m)	T. de avance (min.)	Estación (m)	T. de avance (min.)	Estación (m)	T. de avance (min.)
0	0	0	0	0	0	0	0
20	7	20.9	7	20.9	7	20.6	16
40	17	40.5	18	40.5	18	40.1	32
60	30	60.3	31	60.3	31	59.8	49
80	46	80.6	46	80.6	46	79.8	67
100	63	100.3	62	100.3	62	99.9	86
120	81	119.5	79	119.5	79	120.2	106
140	100	140.5	99	140.5	99	140.4	127
160	122	160	119	160	119	159.7	148
180	140	179.9	141	179.9	141	179.8	171
200	162	200.1	165	200.1	165	199.7	195
209.7	177						

Cuadro 5. Tiempo de avance del predio P.P. Santo Tomas beta San Gabriel melga No.3 datos de campo y datos simulados con los diferentes modelos.

<b>Campo</b>		<b>Hidrodinámico</b>		<b>Cero Inercia</b>		<b>Onda Cinemática</b>	
Estación (m)	T. de avance (min.)	Estación (m)	T. de avance (min.)	Estación (m)	T. de avance (min.)	Estación (m)	T. de avance (min.)
0	0	0	0	0	0	0	0
20	5	20.3	3	20.3	3	19.2	11
40	11	40.6	10	40.6	10	40.7	24
60	18	60.5	18	60.5	18	59.6	36
80	27	79.9	27	79.9	27	80.5	50
100	40	100.8	38	100.8	38	100.4	64
120	52	119.5	49	119.5	49	120.5	79
140	66	139.4	62	139.4	62	139.5	94
160	80	159.9	77	159.9	77	159.7	111
180	96	179.6	93	179.6	93	179.6	129
200	115	200.5	112	200.5	112	200.1	149
220	135	220	132	220	132	219.7	170
240	155						

Cuadro 6. Tiempo de avance del predio P.P. Santo Tomas beta San Gabriel melga No. 14 datos de campo y datos simulados con los diferentes modelos.

<b>Campo</b>		<b>Hidrodinámico</b>		<b>Cero Inercia</b>		<b>Onda Cinemática</b>	
Estación (m)	T. de avance (min.)	Estación (m)	T. de avance (min.)	Estación (m)	T. de avance (min.)	Estación (m)	T. de avance (min.)
0	0	0	0	0	0	0	0
20	8	19.7	9	19.7	9	20.3	19
40	20	39.6	25	39.6	25	40.1	40
60	36	60.4	47	60.4	47	59.8	64
80	66	79.8	73	79.8	73	80.2	93
91.7	92						