

USO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN HIDRÁULICO PARA EVALUACIÓN Y GENERACIÓN DE RECETAS DE RIEGO EN SISTEMAS DE RIEGO SUPERFICIAL EN EL NORTE DE MÉXICO

USE OF HYDROLOGIC SIMULATION MODEL TO EVALUATE AND GENERATE GUIDELINE'S IRRIGATION IN SURFACE IRRIGATION SYSTEMS IN NORTHERN MEXICO

R. C. Loredo Varela¹, I. Sánchez Cohen^{1,2}, G. García Herrera¹, J. G. Arreola Ávila¹, R. Trejo Calzada¹, O. Esquivel Arriaga¹, J. Santana Mendez¹, A. Flores Hernandez¹, J. Ruiz Torres, M de J A. Ruiz Esparza¹

¹ Universidad Autónoma Chapingo. Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas. A.P. 8, C.P. 35230. Bermejillo, Dgo
² Centro Nacional de Investigación Disciplinaria Relación Agua-Suelo-Planta-Atmosfera, Instituto Nacional de Investigación Agrícola Pecuaria y Forestal. Gómez Palacio, Dgo.

RESUMEN: El riego superficial es el método de irrigación más difundido alrededor del mundo y también en México y a su vez es el más ineficiente en el manejo del agua, reportándose valores de Eficiencia de aplicación de alrededor del 60%. Estos resultados tienen diferentes explicaciones como la inexistencia de métodos para la medición del agua que entra a la regadera o que los eventos de riego son realizados en base al conocimiento empírico del regador. Atendiendo este problema, en años recientes, investigadores alrededor del mundo han generado modelos de simulación hidráulica del riego superficial que permiten en forma sencilla y económica evaluar el diseño y operación del riego; sin embargo se presenta una situación problemática cuando en ocasiones, dichos avances permanecen en el ámbito científico y no alcanzan a las personas que toman decisiones del riego, como los productores o regadores. En el presente trabajo se muestra una metodología que se utilizó para evaluar el riego superficial en 9 predios distribuidos en 4 municipios del estado de Durango con cultivos de maíz (*Zea mays*), algodón (*Gossypium hirsutum*), sorgo (*Sorghum vulgare*), avena (*Avena sativa*) y alfalfa (*Medicago sativa*), con el fin de determinar los valores existentes de Eficiencia de Aplicación (Ea), Eficiencia de Requerimiento (Er) y Uniformidad de distribución (UD), auxiliado por el modelo de simulación hidráulico SIRMOD II, para ello se determinaron los parámetros de diseño y operación del riego, realizando mediciones directas en campo y en laboratorio. Después de la evaluación y mediante el uso del SIRMOD II, se generaron modificaciones en los parámetros de riego principalmente gasto unitario (Qu) y Tiempo de Riego (Triego) con el objetivo de encontrar los valores de Qu y Triego que maximicen Ea, Er y UD y así generar una receta de riego. Los resultados promedios de las evaluaciones muestran una Ea de 61%, donde se encuentran predios con valores 84.14% para el sitio "18 de Julio" hasta un 29.15% en el sitio "La Loma", una Er promedio de 99.8 % y un UD de 81.97%. De las propuestas de mejora del riego se tienen reducir el gasto unitario (Qu) a valores entre 2 y 6 lps o reducir el tiempo de riego, esto trae consigo aumentos en el promedio general de todos los sitios con una Ea=87.83% y UD = 86.559%, manteniendo Er=99.786%.

Palabras clave: Riego superficial, Evaluación de riego, Eficiencia de aplicación, Eficiencia de requerimiento, Uniformidad de Distribución, Modelos de simulación hidráulica, SIRMOD II, Receta de riego

SUMMARY: The most important method of irrigation worldwide and in Mexico is surface irrigation, also is the most inefficient in water management, with an average Application Efficiency around of 60%. These values have different explanations, in instance that doesn't exist some method to inflow water measurement into the field or irrigation event, or this is done only with empiric knowledge. In recent years, researchers, worldwide, taking care of this situation generating Surface Irrigation Simulation models, which allow, easily and with lower costs, evaluate designing and operation of irrigation systems. However, such technological advances remain in scientist circle and do not reach users who are making decisions about irrigation, like producers or irrigators. This work shows a methodology that was used to evaluate surface irrigation in 9 sites distributed in 4 counties of Durango State with corn (*Zea mays*), cotton (*Gossypium hirsutum*), sorghum (*Sorghum vulgare*), oat (*Avena sativa*) and alfalfa (*Medicago sativa*). The aim was to find actual values of Application Efficiency (Ea), Requirement Efficiency (Er) and Distribution Uniformity (UD) using SIRMOD II. For this purpose, surface irrigation design and operation parameters were determined using direct measurements in field and laboratory. Then the model was used to generate changes in irrigation parameters with the objective to find the unitary inflow (Qu) and Time of Irrigation (Triego) that maximices Ea, Er and UD to obtain an "Irrigation guidelines". The results of evaluations show a 61% of Ea, with values from

84.14% in "18 de Julio" trail to 29.15% in "La Loma" trail of Ea, for average Er we found an average of 99.8% and average UD of 81.97%. And after doing several simulations we found some alternatives that may improve these irrigation systems, these include reducing Qu to values between 2 and 6 lps m⁻¹ or reduce irrigation time, These actions can increase the general average of these trails in Ea=87.83% and UD= 86.559%, keeping Er=99.786%

Key words: Surface Irrigation, Evaluation Irrigation, Application Efficiency, Requirement Efficiency, Distribution Uniformity, Surface Irrigation Simulation model, SIRMOD II, Irrigation Guidelines

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial es conocido que el sector agrícola es el principal consumidor de agua de entre las diversas actividades que realiza el hombre y dentro de este sector, el riego o suministro artificial de agua a los cultivos es la actividad que mayor agua utiliza. En el caso de México, para el año 2008 el 76.8% del total de las extracciones se utilizó dentro del sector agrícola, principalmente para regar las 6.5 millones de hectáreas que están bajo algún sistema de riego, de las cuales alrededor del 90% es bajo el sistema de riego superficial, donde se pueden encontrar eficiencias de aplicación a nivel parcelario de alrededor del 60%, esto significa un alto potencial para mejorar el uso del agua (FAO, 2006; CONAGUA, 2006; CONAGUA, 2009; Sánchez *et al*, 2005).

En forma general los sistemas de riego superficial utilizan una gran cantidad de agua debido a que tienen eficiencias totales del 35 al 55%. Evaluaciones realizadas en México, muestran bajos niveles de Eficiencia a nivel parcelario al demostrar bajos niveles de Eficiencia de aplicación. En el distrito de riego (DDR) 011 Alto Rio Lerma, Guanajuato se evaluaron cultivos de Trigo, Maíz y Frijol se reportaron eficiencias de aplicación (Ea) del 50-70%. En el DR 017 Región lagunera en Coahuila y Durango en el cultivo de maíz forrajero se encontraron valores de Ea del 51% y DR 025 Bajo Rio Bravo en Tamaulipas valores similares. (Mejía *et al*, 2002) Otro estudio en la región lagunera de evaluación de riego superficial se encontró una Eficiencia de aplicación de 61.37 %, en un cultivo de maíz forrajero (García, 2008).

Diversas investigaciones proponen distintas causas de las bajas eficiencias del riego, una de ellas se relaciona con la baja motivación en los productores para mejorar los métodos de aplicación. Otra causa es la ausencia de sistemas exactos para medir los volúmenes de agua aplicados, la carencia de acceso a herramientas de toma de decisión, la poca formación técnica del regante, que provoca que la operación y diseño del riego se realizado en forma empírica, otra es que raramente se evalúa el desempeño del regadío (Mejía *et al*, 2002; Martín de Santa Olalla *et al*, 2005).

En ocasiones la deficiente aplicación del agua tiene consecuencias que se traducen en bajos rendimientos, por ejemplo en un riego se puede dejar zonas secas o anegadas. Otro impacto se plasma en una reducción en la superficie sembrada, al utilizar excesivos volúmenes de agua (Mejía *et al*, 2002).

Para conocer como se realiza la aplicación de agua en un riego, y poder identificar y solucionar los posibles problemas de manejo y funcionamiento de las instalaciones, hay que realizar una evaluación del sistema (Martín de Santa Olalla *et al*, 2005).

A la fecha se han generado índices que sirven para diagnosticar la funcionalidad de los sistemas de riego y que por lo general consisten en determinar la cantidad de agua que es requerida por las plantas a cierta profundidad o que es usada benéficamente, y la aplicada durante el riego, además de cómo es distribuida a lo largo de la parcela (Sánchez y Catalán, 2006, Catalán *et al*, 2007).

Conociendo estos hechos, investigadores de varios lugares del mundo han generado herramientas y técnicas que sirven para evaluar la eficiencia y uniformidad de los regadíos, y al mismo tiempo mejorar su diseño y operación, como ejemplos se tienen los modelos de simulación hidráulico o las diversas herramientas para aforar el agua. Una mención especial, son los modelos de simulación que son una simplificación de la realidad basada en los mecanismos físicos que aparecen en la naturaleza (Martín de Santa Olalla *et al*, 2005; Catalán, 1995; Walker, 2003).

Mediante la modelación es posible predecir el funcionamiento de los sistemas de riego a partir de las variables de diseño que lo determinan de una manera rápida y aun bajo costo. Existen modelos simples, otros muy complejos y de gran precisión que pueden utilizarse como herramientas de diseño y manejo del riego a nivel parcelario; los más completos se basan en la solución numérica de las ecuaciones de Saint Venat para predecir la distribución del volumen de agua infiltrado (Catalán, 1995) (Camacho, 1997).

Por lo que los modelos de simulación son una herramienta vital en la toma de decisiones para la

evaluación del riego en forma pormenorizada, además de que con su uso puede generar escenarios hipotéticos al modificar distintas variables de entrada que no se pueden plasmar en la realidad. (Martín de Santa Olalla, *et al*, 2005).

Dentro de los distintos modelos que se han generado para simular los sistemas de riego superficial, uno que destaca por su fácil uso y confiabilidad es el SIRMOD II que es un software comprensivo para simulación de sistemas hidráulicos de riego superficial a nivel parcelario, seleccionando una combinación de parámetros operacionales y de tamaño que maximice la eficiencia de aplicación y una solución de dos puntos del problema “inverso” permitiendo el cálculo de parámetros de infiltración desde los datos de avance de entrada. Es compatible con sistemas operativos Windows 95 a Windows XP, correo en versión MS-DOS (Walker, 2003).

El SIRMOD II, fue desarrollado por Utah State University y ha sido utilizado particularmente por investigadores y ha demostrado ser una herramienta útil para mostrar el incremento potencial de las eficiencias del uso del agua en riego superficial (Hurnbuckle *et al*, 2003; Walker, 2003).

Aquí surge una situación problemática cuando en ocasiones, dichos avances permanecen en el ámbito científico y no alcanzan a las personas que toman decisiones del riego, como los productores o los regadores (Catalán, 1995; Walker, 2003).

En el presente trabajo se reportan evaluaciones realizadas en sistemas de riego superficial en nueve predios distribuidos en tres municipios del estado de Durango, México entre los años del 2007-2010, para determinar la Eficiencia de Aplicación (Ea), Eficiencia de requerimiento (Er) y la Uniformidad de Distribución (UD) existentes, con el uso de un modelo de simulación hidráulico llamado SIRMOD II. A partir de tal evaluación y con el mismo software se generaron varias alternativas de mejora de las eficiencias y uniformidades del riego a nivel parcelario, a través de repetidas simulaciones, y que se expresan a través de la generación de una receta de riego.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización geográfica de los sitios evaluados

Se evaluó el desempeño del riego superficial dentro de los años 2007-2010, cuando ya estaban establecidos los cultivos en nueve predios distribuidos en los municipios de Mapimí, Gómez Palacio, Lerdo y Tlahualilo del estado de Durango, México, y que están ubicados dentro del D.R. 017 Comarca Lagunera. Los

cultivos evaluados fueron alfalfa (*Medicago sativa*), avena (*Avena sativa*), maíz forrajero (*Zea mays*), sorgo (*Sorghum vulgare*) y algodón (*Gossypium hirsutum*). Las localizaciones Puntuales de los sitios se presentan en el Cuadro 1:

Cuadro 1. Localización geográfica de los sitios evaluados

Sitio	Municipio	Coordenadas geográficas	
		Latitud (N)	Longitud (O)
18 de Julio	Tlahualilo	25°54'48.39"	103°34'49.39"
Bermejillo 1	Mapimí	25°53'27.30"	103°36'27.69"
Bermejillo 2	Mapimí	25°53'30.77"	103°36'21.73"
La Galega	Gómez Palacio	25°48'18.14"	103°35'02.23"
Montes de Oca	Mapimí	25°51'51.54"	103°36'22.83"
Palo Blanco	Gómez Palacio	25°44'07.53"	103°31'15.67"
León Guzmán	Lerdo	25°29'35.40"	103°38'46.26"
Juan E. García	Lerdo	25°29'50.57"	103°43'16.35"
La Loma	Lerdo	25°28'06.41"	103°40'20.25"

Etapas de Evaluación del Riego Superficial parcelario y generación de recetas de riego

Este trabajo consiste en dos etapas, la primera es la evaluación de las eficiencias y uniformidad del riego superficial parcelario que está actualmente realizando el productor, a partir de determinaciones de parámetros en campo, laboratorio y en gabinete auxiliándose del modelo de simulación de riego SIRMOD II, y la segunda etapa consiste en modificar las distintas variables que inciden sobre el riego para generar una receta de riego que maximice el uso del agua, esto también con ayuda del SIRMOD II.

Evaluación de riego superficial parcelario

La evaluación del riego superficial parcelario incluyen cálculos hechos en campo y en gabinete, en este caso el objetivo de la recolección de datos fue satisfacer las variables de entrada que solicita el SIRMOD II, entonces se realizaron las siguientes actividades en las melgas individuales seleccionadas para evaluación:

- *Caracterización de la infraestructura de riego.*- Consistió en determinar qué tipo de infraestructura se tiene para distribuir el agua a la parcela, las fuentes de abastecimiento y el gasto disponible por el productor.
- *Análisis del cultivo.* - Tipo de cultivo, sus etapas fenológicas, requerimientos de agua, profundidad

de raíces y las etapas críticas de necesidad de agua.

- *Variables de Caracterización del predio*
 - o Determinación de las dimensiones del predio.- Largo y ancho de la melga
 - o Levantamiento topográfico.- Pendiente longitudinal (S_o) y pendiente transversal (S_t).
 - o Coeficiente de rugosidad de Manning (n).- Este parámetro indica la resistencia que opone el suelo al flujo del agua.
- *Propiedades físicas y químicas del suelo.*- Esta es una de las partes fundamentales de la evaluación del riego, pues determina la capacidad de retención del suelo, y las características del flujo del agua a través del suelo. Estos valores se obtuvieron a partir de muestreos de suelos en el predio antes del riego, para su posterior análisis en laboratorio.
 - o Determinación de textura del suelo
 - o Determinación de Materia Orgánica.
 - o Determinación de conductividad eléctrica del suelo.
 - o Determinación de Contenido de Volumétrico de humedad Inicial (\check{Y}_o)
 - o Determinación de propiedades de retención de humedad.- Para establecer las propiedades de retención de humedad del suelo como Capacidad de Campo (CC), Punto de Marchitez Permanente (PMP), Porcentaje de Saturación del suelo ($\% Sa_t$), Humedad Aprovechable (HA), Conductividad Hidráulica a saturación (K_s) y Densidad aparente (da), fueron calculadas utilizando el Programa Soil Water Characteristic (Saxtón y Rawls, 2006).
 - o Determinación de la infiltración.-Las funciones de infiltración son los parámetros más importantes por determinar, ya que indica la capacidad de movimiento del agua en el suelo, los parámetros que el SIRMOD II necesita para operar son a , k , f_0 y C , definidos a partir de la ecuación de Kostiakov y Lewis (Walker, 2003). Existen varios métodos para el cálculo de estos parámetros, aunque con el uso del modelo SIRMOD II, se pueden obtener los valores de los parámetros de tablas, donde se correlacionan los valores de infiltración con la textura del suelo.
- *Aforo de la fuente de abastecimiento de agua.* En este caso, los sitios evaluados presentan distintas fuentes de abastecimiento como: multicompuertas, válvula alfalfa y compuertas de tierra.
- *Prueba de avance y recesión del agua.*-Una de las mediciones que deben ser hechas mas cuidadosamente y que se requiere hacer, es el

avance y recesión del agua en el predio, medido como el tiempo necesario para que el flujo de entrada avance hasta un punto del campo, para el caso del avance, o el tiempo que pasa hasta que el agua ha drenado desde que se ha cortado el flujo de entrada al campo, para el caso de la recesión (Walker, 2003).

- *Uso del SIRMOD II.*- Una vez que se han determinado las diversas variables que inciden el riego y que son necesarios para operar el SIRMOD II, a continuación se mencionan los pasos a seguir para ingresar los datos recabados y utilizar el SIRMOD II.

El ingreso de los datos al programa SIRMOD II involucra dos actividades: 1) Definir las características del sistema de riego superficial bajo estudio, y 2) Definir los parámetros de control operacional del modelo

- o *Características de la parcela*

Cuando es apretado el botón **Datos de Parcela** , se abre una pantalla para la entrada de los datos con tres opciones que pueden ser seleccionados por el usuario:

- *Geometría y topografía del terreno.*- Es descrita por los siguientes parámetros: Coeficiente de rugosidad de Manning (n) para el primer riego y los subsecuentes riegos, longitud del terreno, ancho del terreno, para el caso de riego entre surco distancia entre ellos, pendiente transversal del terreno, y pendiente longitudinales del terreno.

Hay otro dato de entrada que está en la parte inferior derecho, y se tiene que seleccionar la condición límite de aguas abajo, si existe bordo de contención (cerrado) o si no existe, permitiendo la escorrentía (abierto). Un ejemplo es dado a continuación en la Figura 1.

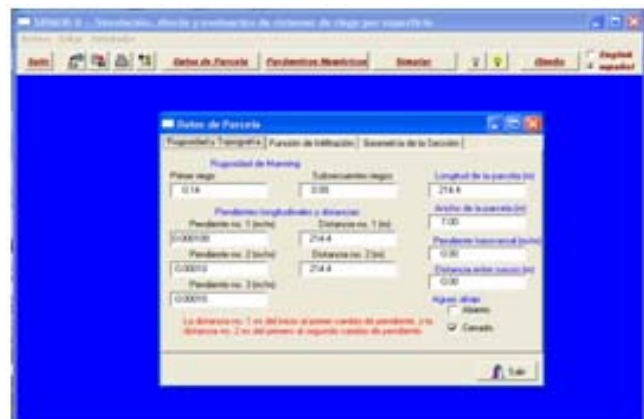


Figura1. Ventana del SIRMOD II donde se ingresan datos de Rugosidad y Topografía (Walker, 2003).

- Datos de Infiltración: Este es el componente más crítico del software SIRMOD II. Se requieren cuatro funciones de infiltración individuales: 1) Una función para las primeras condiciones bajo flujo continuo, 2) Una función para los riegos subsiguientes bajo flujo continuo; 3) Una función para los riegos iniciales bajo el flujo por pulsos; y 4) Una función para los riegos subsiguientes bajo flujo por pulsos. Cada función de infiltración requiere cuatro parámetros, k , a , f_0 y C . Ver *Figura 2*. Debajo de las cuatro **Takes**, están cuatro cajas de edición para la profundidad de infiltración requerida que son lámina de riego requerida ($Zreq$) y el tiempo de oportunidad ($treq$) para la toma de agua del agua asociado.

A la derecha de las cuatro funciones de infiltración están dos parámetros rotulados **Qinfilt** e **Infilt_n**. El parámetro **Qinfilt** es el flujo para el cual están referenciados los diferentes parámetros de Infiltración. Si el usuario no conoce este valor, el caudal de descarga utilizado en la simulación deber ser ingresado en esta caja de edición (Walker, 2003).

Finalmente, en la parte inferior resaltada con color rojo, hay cuatro cajas para marcar con el símbolo de revisado con un rotulo lateral **“Simular”**. El usuario selecciona cuál condición de infiltración será usada en una simulación ejecutada por el programa. Una función de Infiltración para flujo continuo y uno para pulsos puede ser seleccionada.

- Datos del tamaño de la sección por la que cruza el flujo de agua: La *Figura 3* muestra el formato de entrada para ingresar los datos de la sección transversal. Como una regla, la sección transversal del flujo es definida y calculada con cuatro parámetros que son el ancho superior, el ancho en la parte media, la base y la profundidad máxima.

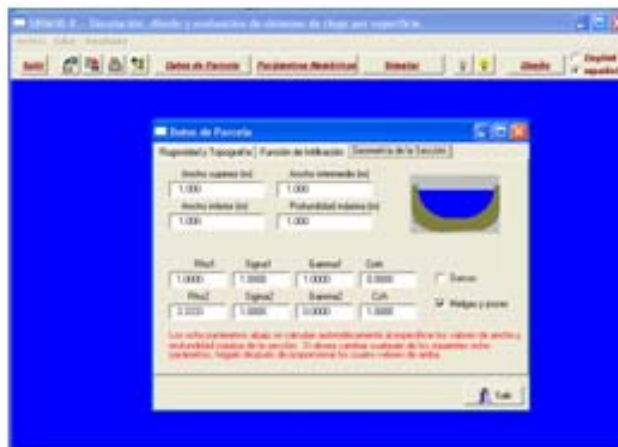


Figura 3. Ventana para ingreso de datos de Geometría de la sección (Walker, 2003).

- Parámetros de operación del riego (Gasto y tiempo de riego)

La ventana para ingresar los datos de operación del riego, se tiene cuando se presiona **Operación Riegos**, una vista general de esta ventana es dada por la *Figura 4*.



Figura 2. Ventana del SIRMOD II donde se muestra donde se ingresan los parámetros de infiltración (Walker, 2003).

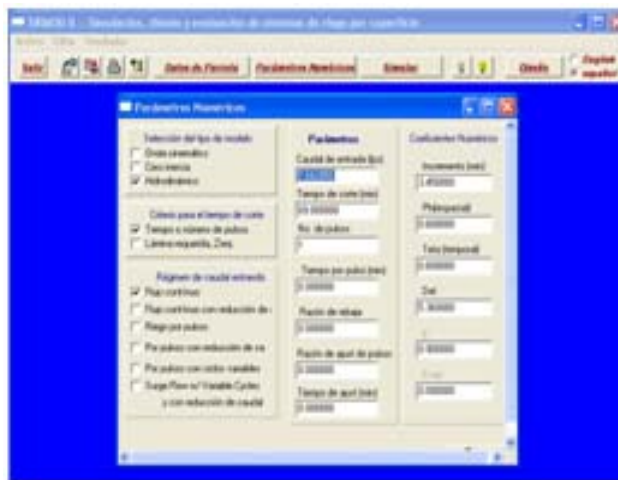



Figura 4. Ventana para el ingreso de los parámetros de operación del riego (Walker, 2003)

- *Tipo de modelo de simulación.*- El programa SIRMOD II Incluye tres opciones para modelar: 1) El modelo de onda cinemática; 2) El modelo de cero inercia; y 3) El modelo hidrodinámico. El modelo seleccionado por *default* es el hidrodinámico. Para nuestro caso utilizamos el modelo hidrodinámico.
- *Simulación del control de corte.*- El modelo SIRMOD II puede hacer simulaciones ya sea especificando un intervalo de tiempo para el suministro del volumen de agua total o especificando una profundidad fija de aplicación. El intervalo de tiempo domina sobre el control de la profundidad, por lo que cuando se use el control de la profundidad, el usuario debe adoptar un número grande para el intervalo de tiempo. Para este trabajo utilizamos como criterio para el tiempo de corte, que es el tiempo de riego.
- *Régimen para el flujo de entrada.* Este programa simula el riego para flujo tanto continuo como por pulsos.
- *Parámetros de control de Flujo.* Existen siete: 1) Caudal de entrada (lps), 2) Tiempo de corte(min), 3) Número de pulsos, 4) Tiempo por pulso (min), 5) Razón de rebaja, 6) Razón de ajuste de pulsos y 7) Tiempo de ajuste (min).
- *Coefficientes numéricos.*- Estos son calculados automáticamente por el programa. Para la simulación típica el usuario no necesita modificarlos.

Simulación

Una vez que los datos han sido ingresados, la simulación es hecha presando el botón . La pantalla de simulación aparecerá y mostrará un dibujo en tiempo real de los perfiles de avance y recesión como se ilustra en la Figura 5.

En la pantalla de salida hay tres regiones. La primera ocupa la mitad superior de la pantalla y dibuja los movimientos del agua para la superficie y para el flujo subsuperficial, en la medida en que son calculadas las trayectorias para el avance y la recesión. El objetivo de lograr la profundidad requerida de aplicación es dibujada como **Zreq**, por lo cual cuando una profundidad infiltrada es mayor que este valor, se puede ver la pérdida de agua de riego como percolación profunda (esto se nota

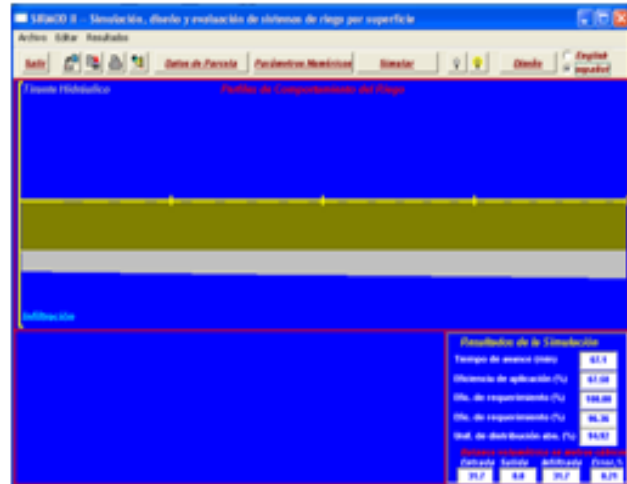


Figura 5: Ventana de simulación del SIRMOD II (Walker, 2003).

por que el color del flujo subsuperficial cambia de color cuando rebasa **Zreq**).

En la parte inferior derecha está un cuadro donde se da un resumen del evento de riego simulado después de que ha acabado la fase de recesión, se tienen entonces los valores de Eficiencia de Aplicación, Eficiencia de requerimiento, y Uniformidad de Distribución absoluta, en términos de porcentaje, además del tiempo de avance en minutos, además de un balance volumétrico en metros cúbicos, además del error ocurrido en la simulación. Como una regla aceptable es un error menor a 5%, aunque la mayoría de las simulaciones se tiene un error cerca del 1%.

Además en la parte inferior izquierda, se tiene un hidrograma de escorrentía para los casos en que no se tenga un dique de contención aguas abajo.

Generación de recetas de riego

Una vez evaluados los predios, el siguiente paso es encontrar aquellos variables del riego que son factibles de modificar, se escogieron gasto unitario (Q_u) en lpsm^{-1} , y el tiempo del riego (T_{riego}) en minutos, porque son relativamente fáciles de modificar, si uno desea mejorar los riegos subsecuentes en el mismo ciclo agrícola y para siembras posteriores la modificación de la pendiente longitudinal (S_o) y transversal (S_t), porque también son relativamente fáciles de alterar, y no se reduce la superficie sembrada, como lo sería al cambiar otras variables de diseño del riego como el largo o el ancho. Utilizando el modelo de simulación hidráulico SIRMOD II, se realizaron repetidas simulaciones, los valores de E_a , E_r y UD se graficaron, para conocer en

forma clara el comportamiento de estos índices al modificar las variables del riego como *Qu* y *Triego*.

Y en una etapa posterior se escogieron aquellos valores ya sea de *Qu* y/o *Triego*, o aun *So* que maximicen la Eficiencia de aplicación (Ea), Eficiencia de requerimiento (Er) y la Uniformidad de Distribución del riego (UD), para cada predio en particular, teniendo de esta forma nuestro objetivo final que es generar para cada predio en particular una receta de riego. Cabe anotar que en primera instancia se realizaron modificaciones en un solo parámetro, ya sea *Qu* o *Triego* manteniendo los otros parámetros sin alterar, si las eficiencias y uniformidades no alcanzaban un valor óptimo (Ea e" 80 %, Er= 100 % y UD e" 85%) se modificaron los dos parámetros (*Qu* y *Triego*) al mismo tiempo. En última instancia si los valores de eficiencias y uniformidad no alcanzaban los valores deseados se modificaron las variables de topografía del terreno como pendiente longitudinal (*So*).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evaluación del desempeño del riego superficial realizado por el productor

Con ayuda del modelo de simulación de riego superficial SIRMOD II, se determinaron los parámetros de Eficiencia de Aplicación (Ea), Eficiencia de Requerimiento (Er) y Uniformidad de Distribución absoluta (UD) realizados por el productor en los nueve predios evaluados, teniendo los siguientes resultados resumido en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Resultados de Ea, Er y UD del riego superficial realizado por el productor.

Sitio	18 de Julio	La Gallega	Palo Blanco	Montes de Oca	Bermejillo 1
Ea (%)	84.14	73.28	82.05	73.69	60.82
Er (%)	100	100	100	100	100
UD (%)	95.13	87.51	92.37	91.39	94.92

...Continuación Cuadro 2

Sitio	Bermejillo 2	León Guzmán	La Loma	Juan E. García	PROM. GRAL.
Ea (%)	52.45	30.02	29.15	78.82	62.713
Er (%)	100	100	100	98.2	99.800
UD (%)	96.49	69.04	44.46	66.42	81.970

Los resultados promedio de la evaluación de los nueve predios nos indican que en forma general se tiende a regar en exceso, debido a que por un lado se satisfacen los requerimientos de la planta Er= 99.8%, pero la

Eficiencia de aplicación es baja Ea=62.713%. Estos valores son similares a los reportados por diversos investigadores como por Hernández (1991) (citado por Catalán, 1995) que encontró en cultivos de algodón y Ballico en la comarca Lagunera en los años de 1982-1984, valores de Ea=67% para el Algodonero y una Ea=63% para Ballico. Otras evaluaciones hechas en diversos distritos del país como en el distrito de riego No. 11 Alto Rio Lerma, Guanajuato donde se evaluaron cultivos como Trigo, Maíz y Frijol reportan eficiencias de aplicación (Ea) del 50-70%, DDR 017 Región lagunera en Coahuila y Durango evaluando maíz forrajero se encontraron valores de Ea del 51% y DDR 025 Bajo Rio Bravo en Tamaulipas valores similares (Mejía *et al*, 2002).

Durante la evaluación también encontramos que existieron diversas diferencias entre los diversos predios evaluados encontrándose lugares con una alta Ea, como es el caso de los sitios "18 de Julio" y "Palo Blanco" donde los valores para Ea fueron 84.14% y 82.05% respectivamente, otro caso donde se observo una relativamente alta Ea fue para el sitio "Juan E. García" con valores de 78.82%, por otra parte se evaluaron sitios con una baja Ea, por ejemplo los sitios "La Loma", "León Guzmán" y "Bermejillo 2", con valores de 29.15%, 30.02% y 52.45% respectivamente. Estos señalan la variabilidad de un predio a otro, o aun de una melga a otra.

Recomendaciones de Riego

A continuación se presentan recomendaciones del manejo del Gasto Unitario (*Qu*) (lpsm^{-1}) y Tiempo de riego (*Triego*) (minutos), para incrementar la Eficiencia de Aplicación (Ea), Eficiencia de requerimiento (Er) y Uniformidad de distribución (UD), para cada sitio en particular.

Se presentan dos recomendaciones para cada caso, una hecha en base al *Qu* y otra en base al *Triego*, estas recomendaciones son excluyentes. Esto quiere decir que solamente podemos utilizar ya sea el *Qu* recomendado o *Triego* recomendado no ambas al mismo tiempo, para lograr los valores de Eficiencias y uniformidades escritos (Cuadro 3, Cuadro 4 y Cuadro 5).

Al promediar los valores de Ea, Er y UD posibles a alcanzar, siguiendo alguna de las recetas de riego se tienen valores promedios generales de **Ea= 87.83%**, **Er= 99.786%** y **UD=86.559%**.

A partir de las múltiples simulaciones, modificando únicamente los parámetros de operación del riego como Gasto Unitario (*Qu*) y Tiempo de Riego (*Triego*), o sus combinaciones y solo en el caso de Juan E. García la

Cuadro 3. Receta de Riego en base solamente a Tiempo de riego (Triego) en Minutos, además de los valores de Ea, Er y UD esperados

Sitio	Recomendación Triego (min)	Valores de Eficiencia y Uniformidad		
		Ea (%)	Er (%)	UD (%)
18 de Julio	65	94.97	99.99	94.72
La Gallega	83	88.25	99.91	85.23
Palo Blanco	58	91.17	100	91.85
Montes de Oca	93	88.58	99.56	82.67
Bermejillo 1	47	93.22	100	93.7
Bermejillo 2	80	90.25	100	97.02
Juan E. García So (7%)	50	78.07	98.52	66.8
Juan E. García So (5%)	50	82.79	99.93	80.99

Cuadro 4. Receta de Riego en base solamente a Gasto Unitario (Qu) en lps m⁻¹, además de los valores de Ea, Er y UD esperados.

Sitio	Recomendación Qu (lps m ⁻¹)	Valores de Eficiencia y Uniformidad		
		Ea (%)	Er (%)	UD (%)
18 de Julio	2.5	94.49	100	94.54
La Gallega	1.4	88.15	99.84	85.23
Palo Blanco	4.5	91.95	99.99	91.65
Montes de Oca	2.9	87.14	99.98	86.09
Bermejillo 1	5	89.3	100	93.05
Bermejillo 2	2.6	91.78	100	94.55
Juan E. García So (7%)	11.5	75.48	99.37	69.04
Juan E. García So (5%)	11	84.79	99.66	80.41

Cuadro 5. Receta de Riego o recomendación de riego en base a Qu (lps m⁻¹) y Triego (minutos), además de los valores de Ea, Er y UD esperados.

Sitio	Recomendación Triego y Qu	Triego y Qu		
		Ea (%)	Er (%)	UD (%)
León Guzmán	5.5 lps m ⁻¹ , 75 min	87.83	100	86.559
La Loma	3 lps m ⁻¹ , 175 min	82	99.41	75.34

pendiente longitudinal (So), se pudo apreciar que se puede incrementar significativamente la Eficiencia de Aplicación, repercutiendo en un ahorro de agua, esto concuerda con lo planteado con Martín de Santa Olalla (2005) y Walker (2003) en el sentido de que en ocasiones

no es necesario invertir grandes cantidades de capital o realizar cambios drásticos en el diseño u operación del riego, para tener valores de Ea aceptables.

En el caso del sitio "Juan E. García" no se recomendaron mayores cambios en el regadío, debido a las inquietudes del regante, de tener condicionado a 60 minutos aproximadamente el tiempo de riego, por lo que se optó, por modificar la pendiente longitudinal del terreno, con el fin de lograr mayores Eficiencias y uniformidades.

Al comparar los valores evaluados y los recomendados en la receta de riego, se observa una reducción ya sea del gasto unitario (Qu) o del Tiempo de riego (Triego) o ambas simultáneamente, como se observa en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Comparación entre los parámetros de operación (Qu y Triego) evaluados y recomendados para incrementar eficiencias y Uniformidad

Sitio	Qu (lpsm-1) evaluado	Qu (lpsm-1) Rec.	Triego (min.) evaluado	Triego (min.) Rec.
18 de Julio	2.822	2.5	73	65
La Gallega	1.6875	1.4	100	83
Palo Blanco	5	4.5	65	58
Montes de Oca	3.183	2.9	113	93
Bermejillo 1	7.66281	5	69	47
Bermejillo 2	4.474	2.6	144	80
Juan E. García So =7% *	11.35	11.5	53	50
Juan E. García So =5% *	11.35	11	53	50

Continuación cuadro 6

Sitio	Qu (lpsm-1) evaluado	Triego (min.) evaluado	RM y Triego combinados
León Guzmán	13.79	88	5.5 lps m ⁻¹ 75 minutos
La Loma	14.854	102	3 lps m ⁻¹ 175 minutos

* Nota: No se observaron grandes diferencias entre los valores de Qu evaluado y Qu Recomendado, debido a la inquietud de los productores que tienen condicionado solo alrededor de 60 minutos para regar sus terrenos, "obligándose" a utilizar una gran volumen de agua.

Las recetas de riego generadas después de repetidas simulaciones manteniendo constante todas las variables de diseño y operación del riego, excepto Triego, para encontrar la receta de riego en base a Tiempo, consistió básicamente en reducir el tiempo de riego, manteniendo todas las otras variables sin alterar; para el caso de cuando se modificó solo Qu, consistió solamente en

reducir el Gasto unitario a valores entre 1.4 y 11.5 lpsm⁻¹. Estas clase de recomendaciones se dieron para 6 de los 9 predios evaluados. Para el caso de los sitios "León Guzmán" y "La Loma" una combinación de valores de Qu y Triego fueron necesarios para generar una receta de riego optima para el sitio, y consistió forma general reducir el Qu e incrementar el tiempo de riego (para el caso del sitio "La Loma") y reducir solo 3 minutos el tiempo de riego de la evaluación. En el caso del sitio "Juan E. García" no se sugieren mayores cambios en el regadío, debido a las inquietudes del regante, de tener condicionado a 60 minutos aproximadamente el tiempo de riego, por lo que se opto, por modificar la pendiente longitudinal del terreno, con el fin de lograr mayores Eficiencias y uniformidades

CONCLUSIONES

El uso del modelo de simulación hidráulico SIRMOD II, es una herramienta que permite conocer en forma rápida, exacta y económica, el desempeño de los sistemas de riego superficial parcelario, y a partir de aquí es posible generar alternativas de mejora del regadío al tener la posibilidad de simular repetidamente, y de generar diversos escenarios, hasta encontrar las combinaciones que nos permitan lograr una alta eficiencia y uniformidad.

En las evaluaciones en los distintos predios se encontró que en forma general se tiende a regar en exceso, debido a que por un lado se cumple con la lamina requerida por los cultivos ($E_r = 99.8\%$), pero se tiene una Eficiencia de aplicación (E_a) del 62%, donde se encuentran predios con valores cercanos a lo recomendable para riego superficial (E_a e" 85%) como los sitios 18 de Julio ($E_a = 84\%$) y Palo Blanco ($E_a=82\%$), los demás lugares evaluados se encuentran por debajo de los valores óptimos, incluso valores muy bajos como los sitios León Guzmán y La Loma, donde E_a alcanzan 30.02% y 29.15% respectivamente. Esto nos habla de la alta variabilidad de un predio a otro, o aún más de una melga a otra y lo que nos condiciona a hacer las evaluaciones en forma particular, imposibilitando la extrapolación de resultados, por lo que se aconseja realizar el mayor numero de evaluación que sean posibles.

En cuanto a la Uniformidad de Distribución (UD) del agua en los predios, el promedio general resulto en 81.97%, teniendo un rango que va desde 96.49% en el sitio Bermejillo 2, hasta un 44.46 % en el sitio La Loma, atribuido principalmente a la pendiente de la parcela. Esto habla en forma general de una adecuada distribución del agua en el terreno. Los valores promedios encontrados en la evaluación coinciden con los encontrados en previas investigaciones.

Con ayuda del modelo de simulación SIRMOD II, se generaron varias alternativas para la mejora desempeño del regadío, pudiéndose lograr incrementos globales en $E_a=85.82\%$, y $UD =84.54\%$, y manteniendo $E_r = 99.78\%$. Esto quiere decir que con estos ajustes planteados se puede mejorar la distribución del agua sobre el terreno, aplicando solo la cantidad de agua que puede retener el suelo a cierta profundidad, para satisfacer los requerimientos de la planta. Esto se logra reduciendo el Qu a valores entre 1.4 a 5 lpsm⁻¹, excepto en el sitio Juan E. García donde los productores dicen que están condicionados con aproximadamente una hora de riego, por cada parcela los que los obliga utilizar un gran volumen de agua, también se recomienda en forma general una reducción en el tiempo de riego.

En la mayoría de los casos (seis de los nueve predios) para incrementar el desempeño de los regadíos solamente consiste en modificar uno de los parámetros de operación del riego como gasto unitario (Qu) o Tiempo de riego (Triego), en los sitios León Guzmán y La Loma es necesario alterar los dos parámetros de operación y en el sitio Juan E. García, es recomendable cambiar la pendiente del terreno, para tener un incremento significativo de la E_a , principalmente a tribuido a la alta pendiente del terreno (7%), en un suelo con textura arcillo-limosa.

Cabe destacar que cada predio debe tomarse como un caso en particular, debido principalmente a la variabilidad temporal y espacial de las propiedades del suelo, a las variaciones en los parámetros de operación del riego, a las diferencias de topografía del terreno y de su geometría, y a los cultivos presentes.

LITERATURA CITADA

- Camacho Emilio; Pérez Carlos; Roldán, Jorge y Alcaide Miguel. 1997. Modelo de Manejo y control en tiempo real del riego por surcos. España. Revista Ingeniería del agua. Vol. 4 (4):11-18.
- Catalán Valencia, Ernesto Alonso. 1995. Metodología para la generación de guías de riego superficial parcelario. Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas Pecuarias y Forestales. Centro Nacional de Investigación Disciplinaria Relación Suelo Agua Planta Atmosfera. Gómez Palacio, Durango, México. 36 Pág.
- CONAGUA. 2006. Curso Aqua. Fecha de actualización octubre de 2006. México, D.F. 104 Pág. Comisión Nacional del agua. Archivo en línea disponible en: ftp://ftp.consejosdecuenca.org.mx/pub/downloads/CNA/DirGal/curso_aqua_completo.pdf
- CONAGUA. 2009. Atlas del agua 2009. SEMARNAT. México. D.F. 122 Pág. Archivo disponible en <http://cenca.imta.mx/pdf/SGP-25A-Atlas.pdf>

- FAO. 2006. Food and Agriculture Statics: Global Outlook. Disponible en el sitio de Internet <http://faostat.fao.org/Portals/Faostat/documents/pdf/world.pdf>
- FAO.2010. Aquastat. Última visita 04-01-2010. Tomado del sitio de Internet <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html>
- Fernández Ramírez, Roció. 2005. El impacto de la tarifa eléctrica subsidiada sobre la adopción de tecnología de riego. Universidad de las Américas Puebla. Escuela de ciencias sociales. Departamento de economía. Puebla, México
- García Domínguez, Mirna Yesenia. 2008. Evaluación de la eficiencia de riego en el modulo IV del distrito de riego 017 Comarca Lagunera. Tesis. URUZA-UACH. Bermejillo, Durango, México. 52 Pág.
- Hurnbuckle, J.W.; Christen, E.W. y Faulkner, R.D. 2003. Use of SIRMOM as a quasi real time surface Irrigation Decision support model. CSIRO Land and water, CRC eWater, University of New England, CRC Irrigation features.
- Martín de Santa Olalla, Francisco *et al.*, 2005. Agua y Agronomía. Universidad de Castilla La Mancha. Editorial Mundi-Prensa. Madrid España. 603 Pág.
- Mejía, S.E.; Palacios, V.E.; Exebio, G.A. y Santos H.A.L. 2002. Problemas operativos en el manejo del agua de riego en los distritos de riego. México. Terra 20 (2): 217-225.
- Sánchez Cohen, Ignacio; Macías Rodríguez, Hilario; Heilman, Phil y Mann, Roy. 2005. Planning for increasing irrigation efficiency in Mexico. Institutions for Sustainable Watershed Management: Reconciling Physical and management ecology in the Asia-Pacific. Honolulu. Hawaii. 5 Pág.
- Saxtón, K.E. y Rawls, W.J. 2006. Soil Water Characteristic Estimates by texture and organic Matter for Hydrologic Solutions. Soil Sciences Society American Journal. Vol. 70: 1579-1578.
- Walker, Wynn R. 2003. SIRMOM III Surface Irrigation Simulation, Evaluation and Design. Utah State University. Logan, Utah, Estados Unidos de América. 146 Pág.