



Planeación del riego en el cultivo de algodónero (*Gossypium hirsutum* L.), mediante un modelo de programación integral en el Distrito 075, Sinaloa, México

Cotton crop irrigation planning (*Gossypium hirsutum* L.) through an integral programming model at 075 District, Sinaloa, Mexico

Ernesto Sifuentes Ibarra^{1,*}, Jesús del Rosario Ruelas Islas², Juan J. Soto Flores¹, Jaime Macías C.¹, Cesar A. Palacios Mondaca²

¹ INIFAP-CIRNO-CEVAF. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Valle del Fuerte Km. 1609 Carretera Internacional México-Nogales. Juan José Ríos, Sinaloa. México.

² Universidad Autónoma de Sinaloa. Escuela Superior de Agricultura del Valle del Fuerte. Calle 16 y Av. Japaraqui, Juan José Ríos, C.P 81110. Ahome, Sinaloa.

Recibido 03 abril 2014. Aceptado 17 junio 2014.

Resumen

El cultivo de algodónero en las décadas de los 50's y 80's fue uno de los más importantes en los valles agrícolas del norte de Sinaloa, México desde el punto de vista económico. Sin embargo, factores como su monocultivo y problemas fitosanitarios provocaron su desaparición. Ante la necesidad de diversificar el patrón actual de cultivos sembrados en la zona, existe la posibilidad de reintroducir el cultivo, sin embargo, se carece de información actualizada sobre riegos y manejo agronómico. Con el fin de contribuir a una nueva planeación del cultivo se utilizó un modelo integral de programación de riego con el cual se estimaron la ventana de siembras y la planeación del riego a diferentes niveles de operación hidráulica. Experimentos de campo se condujeron durante el ciclo agrícola otoño-invierno 2011-2012 en tres localidades del norte de Sinaloa en los municipios de Ahome y Guasave, en cada parcela se establecieron cinco variedades en una superficie de dos hectáreas con el propósito de calibrar el modelo para posteriormente realizar una serie de simulaciones en siete fechas de siembra y estimar los requerimientos hídricos y duración del ciclo. Al final del ciclo se obtuvo una acumulación de 2400 GDA (Grados de días acumulados) (100% de bellotas abiertas) para condiciones locales, un requerimiento hídrico de 500 mm para el mes de Julio y 870 mm para el mes de Octubre, después de este disminuyen nuevamente las necesidades hídricas llegando a 690 mm para siembras del mes de Enero.

Palabras clave: modelo integral, planeación del riego, grados día crecimiento, requerimiento hídrico.

Abstract

Cotton crops were one of the most important during the 50 and 80 decades in Northern Sinaloa, Mexico from the economical point of view. However, external factors such as monoculture and sanitary issues caused its disappearance. Due to the need of diversifying the actual pattern of crops grown in the zone, a great possibility of re-growing cotton crop exists. Actually, there is lack of updated information about irrigation and agronomic management practices of the crop. In order to contribute to a new crop planning, an integral programming model was used to estimate planting dates and windows as well as irrigation planning at different operation levels. Field experiments were conducted at different locations of northern Sinaloa during the growing season 2011-2012 in Ahome and Guasave counties. Each plot had a dimension of 2 hectares and five varieties grown with the purpose of calibrating the integral model to then realize a set of simulations with seven planting dates, estimate water requirements and length of growing season as well. At the end of the season (harvest) 2400 growing degree days were accumulated (100% open balls) for local conditions, water requirements were 500 mm for the month of July, 870 mm for October, after that it declined to a point of 690 mm for crops planted in January.

Keywords: integral model, irrigation planning, growing degree days, water requirements.

* Autor para correspondencia

E-mail: sifuentes.ernesto@inifap.gob.mx (E. Sifuentes)

1. Introducción

El cultivo del algodón se produce en muchas partes del mundo, incluyendo Europa, Asia, África, América y Australia utilizando genotipos que han sido genéticamente modificadas para obtener más fibra (Fundación Produce Sinaloa, 2007). En México la superficie dedicada a este cultivo del año 1981 al 2000 disminuyó al 74% (Gómez, 2000; ASERCA, 2002). La reducción de la superficie y los rendimientos de algodón en México se deben al alto costo de producción, insectos plaga, precios estáticos y principalmente a escasez de agua (Enríquez *et al.*, 2007); por esa razón productores de otras regiones como en los estados de Sonora y Baja California han cambiado su estrategia de producción con variedades que tengan un ciclo fructífero primario más fuerte y compacto que las variedades de ciclo largo o cambiando a otros cultivos como el maíz para el caso del estado de Sinaloa.

Como parte del cambio climático, en México Modelos de Circulación General Acoplados (MCGA) pronostican un decremento de la precipitación en la mayor parte de su territorio (Montero y Pérez, 2008). Allen *et al.* (1991) muestran que estos cambios en los requerimientos de riego se derivan del efecto de la disminución de la precipitación, del impacto del incremento de la temperatura, evapotranspiración de referencia (ETo) y del acortamiento del ciclo fenológico con un mayor consumo de agua por año agrícola.

En las zonas de riego del noroeste de México existe limitada o nula información para la planeación técnica del riego con eficiencias de aplicación menores al 50%, Organismos como IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua) y el INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias) han venido generando investigación en ingeniería de riego y el uso de modelos de programación integral para la calendarización precisa del riego

bajo diferentes escenarios climáticos aplicados a través de tecnología de informática en cultivos como maíz, frijol, papa y sorgo ubicados en el distrito de riego 075 en el norte de Sinaloa.

Méndez-Natera *et al.* (2007) sugieren que la programación del riego en áreas de algodón, requieren del uso de nuevas metodologías de fácil codificación en sistemas más tecnificados. La incorporación del concepto de días grado-crecimiento para describir los parámetros asociados a la calendarización del riego, es una alternativa factible en parcelas algodonerías y su aplicación a grandes distritos que permitirá tener mayor control sobre el uso eficiente del agua (Barboza *et al.*, 2007). Los requerimientos de riego en cultivos, varían temporal y espacialmente en función del clima, manejo, fase de crecimiento y la variedad sembrada, por lo que su cálculo debe ser hecho de manera local (Ojeda *et al.*, 2006).

Krieg (1998) menciona que la calendarización de riego debe ser diseñada e implementada para minimizar el riesgo del rendimiento al reducir el estrés hídrico durante todo el ciclo del cultivo estimando el uso consuntivo diario del cultivo el cual se define como la cantidad de agua usada por el crecimiento vegetativo en transpiración y construcción de tejido y de aquel evaporado del suelo o el follaje. En Arizona, USA y Valle de Mexicali, Baja California, los cultivos de algodón tienen un uso consuntivo de 105 cm de agua, incrementando la tasa en etapas tempranas de crecimiento correspondientes a primera flor y floración temprana, alcanzando su máximo en floración y después declinando a medida que el cultivo alcanza su madurez (Erie *et al.*, 1981). De acuerdo a Martín (2001) un método comúnmente utilizado para saber cuándo regar es siguiendo el abatimiento de agua en el suelo que consiste en determinar volumen de agua que el cultivo extrae de la zona activa radicular, ese punto de abatimiento puede diferir entre cultivos y variar con las etapas del cultivo.

Investigación científica en el Valle de Mexicali y Valle del Yaqui en Sonora, México utiliza las recomendaciones actuales implementadas en el estado de Arizona de regar cultivos como algodón cuando el porcentaje de humedad aprovechable se acerca al 50% (Martin, 2001; Herrera *et al.*, 2002). Investigación de campo conducida en Arizona por Steger *et al.* (1998) señalan una ventana de 389 a 667 unidades calor después de la siembra (UCDS) que corresponde al periodo de formación de cuadros y primera flor para el primer riego de auxilio. No obstante, que un blanco general podría ser aproximadamente a las 500 UCDS en etapa de cuadro susceptible. Además sugieren que esa ventana podría variar dependiendo el tipo de suelo y clima.

En términos de manejo de agua por el cultivo, no solo el riego de pos-plante o riegos subsecuentes son importantes sino la fecha del último riego. De acuerdo a estudios conducidos por Silvertooth, (2001) una etapa de desarrollo importante es madurez fisiológica. Esta etapa puede ser estimada contando el número de nudos en el tallo principal por encima de flor blanca (NAFB ~5) y ocurre aproximadamente a 2500 UCDS en lugares como Arizona, Sonora y Baja California. Por lo tanto, un enfoque generalizado para terminar con los riegos consiste en seleccionar el último set de bellotas que se intentan cosechar, seleccionar el día del riego proporcionando al menos 333 UCDS de condiciones óptimas de humedad para un desarrollo completo de la fibra.

Ante esta situación, el norte de Sinaloa, México ubicado en el noroeste del país requiere de nuevas alternativas para la diversificación y reconversión productiva que contribuyan a afrontar los problemas de disponibilidad de agua causada por efectos de cambio climático, explotar oportunidades de comercialización internacional debido a un incremento de la demanda de fibras naturales y promover prácticas de rotación de cultivos en esta zona. Para contribuir con lo anterior en el

presente se plantearon los siguientes objetivos: 1) calibrar un modelo integral de programación del riego para el cultivo de algodón; 2) estimar los requerimientos hídricos del cultivo para diferentes fechas de siembra en el distrito de riego 075 Río Fuerte y 3) definir un criterio para la aplicación del último riego.

2. Material y métodos

El trabajo se realizó durante el ciclo agrícola 2011-2012 en tres Campos Experimentales ubicados en el norte de Sinaloa localizado en los 25°45'49" Latitud Norte y 108°51'41" de Longitud Oeste con una altura de 32 metros sobre el nivel del mar, en la parte central del distrito de riego 075 Río Fuerte (el más extenso de México), colindando al sur con el distrito de 063 Guasave y al norte con el distrito 076 Valle del Carrizo. La temperatura media anual es de 25 °C con máximas de 43 °C, que generalmente se presentan en Agosto y Septiembre y mínimas hasta de 2 °C que se registran en Enero; los suelos de esta zona son de textura predominantemente arcillosa y franco-arcillosa (Figura 1).

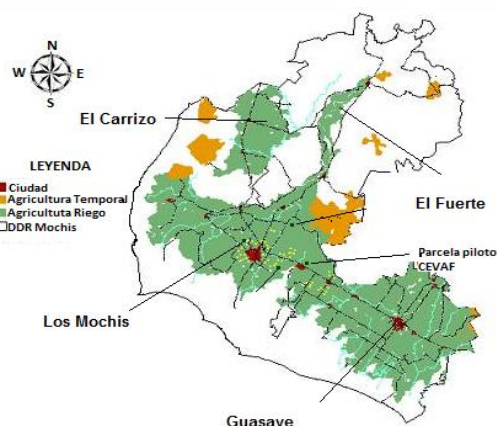


Figura 1. Localización de las áreas de estudio. Distrito de riego 075, norte de Sinaloa, México.

Las localidades donde se establecieron las parcelas de estudio fueron: Campo Experimental del Valle del Fuerte (CEVAF) del INIFAP, Campo Experimental La Despensa y Campo

Experimental Miguel Leyson Pérez. La dimensión de cada parcela fue de 2 hectáreas en suelos de textura arcillosa, franco-limoso y franco arcillosa para cada una de las localidades respectivamente. Las fechas de siembra fueron 03/11/11 para el campo experimental La Despensa, el 10/11/11 para el campo Miguel Leyson y el 10/01/122 para el campo del Valle del Fuerte. Se evaluaron cinco variedades de algodón DP-393, DP-0935B2RF, DP-167RF, DP-0912B2RF y DP-1044B2RF sembradas en tierra húmeda con excepción de la última localidad, todas a una separación de 80 cm, profundidad de 12 cm y una densidad de siembra de 150 mil semillas por hectárea.

Medidas del mapeo de plantas se coleccionaron de todas las parcelas en intervalos de 15 días, las cuales consistieron en altura de planta, número de nudos, posición de la primera rama fructífera, etapas de botón floral, floración, formación de bellotas, número y apertura de bellotas con el fin de definir la aparición de cada etapa fenológica en función de grados día acumulados para condiciones locales de la región. Para calcular la humedad del terreno antes y después de cada riego se tomaron valores de humedad del suelo utilizando TDR-300 (Time Domain Reflectometry) y con muestras de suelo a profundidades de 30 y 60 cm utilizando el método gravimétrico.

La temperatura del suelo fue monitoreada diariamente desde la siembra hasta la

emergencia de la plántula a la profundidad de la semilla en diferentes puntos del sitio CEVAF. Los datos climáticos como temperatura ambiente, humedad relativa, radiación solar se tomaron con la estación meteorológica del CEVAF localizada a pocos metros del sitio experimental. Con los datos de temperatura se calcularon los grados días acumulados (GDA) con las siguientes formulas (Ojeda *et al.*, 2006):

$$GD = Ta - Tc - min, \text{ si } Ta < Tc - max$$

$$GD = Tc - max - Tc - min, \text{ si } Ta \geq Tc - max$$

$$GD = 0, \text{ si } Ta \leq Tc - min$$

Donde Ta es la temperatura ambiente, $Tc - min$ es la temperatura crítica mínima del cultivo (13 °C), $Tc - max$ es la temperatura crítica máxima del cultivo (30 °C) de acuerdo con Baskerville y Emin (1969). El modelo de programación integral del riego fue el generado por Ojeda *et al.* (2004) para el cultivo de papa en el valle del Fuerte cuya base fundamental son los parámetros: coeficiente de cultivo (K_c), profundidad dinámica de raíz (P_r) y factor de abatimiento (f) expresadas como funciones no lineales, cuya variable independiente (X) representa los grados día acumulados (GDA) haciéndolas autoajustables a variabilidad climática, presente en la amplia temporada de siembras de esta región que van desde el mes de Septiembre a Enero y por los efectos del cambio climático; dichas funciones se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1

Modelos y parámetros de calendarización usados en programación integral del riego para el norte de Sinaloa (Ojeda *et al.*, 2004)

Variable	Modelo	Parámetro
Coeficiente de cultivo	$K_c = K_{max} \operatorname{erfc}\left(\frac{x - x_{K_{max}}}{\alpha_1}\right)^2$ <p>si $K_c < K_{co}$, entonces $K_c = K_{co}$</p>	K_{max} XK_{max} α_1 K_{co}
Profundidad radical	$P_r = P_{ro} + (P_{rmax} - P_{ro}) \left[1 - \exp\left[-\frac{(GDA_n)^2}{\alpha_2^2}\right] \right]$	P_{ro} P_{rmax} α_2
Factor de abatimiento	$f_n = \alpha_3 - \alpha_4 K_{cn}$	α_3 α_4

Donde K_{c_0} es el coeficiente de cultivo para la primera etapa fenológica la cual depende esencialmente de la evaporación del suelo, $K_{máx}$ es el máximo valor de K_c durante su desarrollo, $XK_{máx}$ corresponde a una variable auxiliar definida por los GDA cuando el cultivo tiene su máximo coeficiente de cultivo, α_1 es un parámetro de regresión obtenido mediante ajuste de datos experimentales, $erfc$ es la función complementaria del error y x es una variable auxiliar calculada con la siguiente expresión:

$$X = \frac{GDA}{\alpha_0}$$

Donde GDA son los grados día acumulados desde la siembra o emergencia hasta un tiempo determinado y α_0 son los GDA requeridos hasta alcanzar la madurez. P_{r0} y $P_{r máx}$ representan la profundidad de siembra y profundidad máxima de la raíz respectivamente, el valor α_2 del modelo es ajustado empíricamente de un valor aproximado a 2/3 del valor GDA donde el cultivo alcanza la profundidad radical máxima. Los valores de los parámetros α_3 y α_4 para el factor de abatimiento f son calibrados considerando la sensibilidad del cultivo al estrés hídrico y las prácticas del manejo por sistema del riego.

En la calibración del modelo integral de programación del riego se utilizó una macro con lenguaje Visual Basic utilizando en una hoja de cálculo del programa Excel que contiene dicho modelo. En esta macro y con los resultados obtenidos de las variables evaluadas en las tres localidades como fenología, humedad del suelo, riegos, etc., se calibraron los parámetros del modelo K_{max} , XK_{max} , α_1 , K_{c0} , P_{r0} , $P_{r max}$, α_2 , α_3 , α_4 para que estuviera en condiciones de modelar los requerimientos hídricos del cultivo en base a grados día (GDA). De la misma manera se estimaron los requerimientos hídricos potenciales para el cultivo del utilizando datos climáticos históricos realizando simulaciones para diferentes fechas de siembra. Posteriormente se tomó la sumatoria de ET_o y ET_r al final del ciclo el cual fue

calculado tomando como referencia los grados día acumulados (GDA) en el experimento de campo y determinar madurez fisiológica en cada fecha de siembra. El criterio de aplicación del último riego considero los grados día acumulado y etapa fenológica además del contenido de humedad del suelo a final de madurez fisiológica para evitar estrés hídrico. Al final del ciclo agrícola se evaluó el rendimiento potencial del cultivo colectando una muestra de 595,2 m² por variedad.

3. Resultados y discusión

En las tablas 2 y 3 se presentan las etapas fenológicas observadas en las cinco variedades estudiadas en el CEVAF, expresadas en función de la acumulación de calor o grados día (GDA) así como la duración de las mismas en días calendario (DDS).

Tabla 2

Fenología observada de cinco variedades de algodónero (DP393, 167RF, 0935B2RF, 0912B2RF, 1044B2RF) establecidas el 10/01/12 (ciclo otoño-invierno 2011-2012) en el Campo Experimental Valle del Fuerte (CEVAF), norte de Sinaloa, México

Fecha	DDS	GDA (etapa)	GDA	Etapas
15/03/12	65	252,99	252,99	Desarrollo vegetativo
02/04/12	83	139,34	392,33	Desarrollo vegetativo
17/04/12	98	111,75	504,08	Botón floral
15/05/12	126	295,55	799,64	Floración
04/06/12	146	279,64	1079,28	Bellota
18/06/12	160	211,30	1290,58	Bellota
02/07/12	174	236,35	1526,93	18% Bellotas abiertas
18/07/12	190	268,13	1795,05	80% Bellotas abiertas
23/08/12	227	617,13	2394,99	100% Bellotas abiertas

DDS = días después de la Siembra.

GDA = Grados Día Acumulados.

Tabla 3

Días calendario (DDS) por etapa fenológica registrados en cinco variedades de algodónero (DP393, 167RF, 0935B2RF, 0912B2RF, 1044B2RF) establecidas en tres localidades del norte de Sinaloa, México

Fecha de siembra	Localidad	ETAPAS (DDS)				
		Botón floral	Floración	Formación de Bellotas	Apertura de Bellotas	Cosecha
3/Nov/2011	La Despensa	120	148	162	210	268
10/Nov/2011	Miguel Leyson	124	141	160	198	239
10/Ene/2012	CEVAF	98	121	126	160	226

DDS = Días después de la Siembra

En la parcela experimental CEVAF se monitoreo la humedad del suelo antes y después del riego, los valores de humedad volumétrica (cm^3/cm^3) antes del riego obtenidos mediante muestreo y los modelados muestran que son muy cercanos entre sí a excepción del primer riego ya que en este la humedad modelada fue más alta con respecto a la medida en campo, debido a que se realizó resiembra del cultivo el 10/01/12 con la humedad residual de una fecha anterior (Figura 2). En la primera fecha fue necesario eliminar la planta por una fuerte infestación de hongos (damping-off) que causo la pérdida en más de 70% de las plantas.

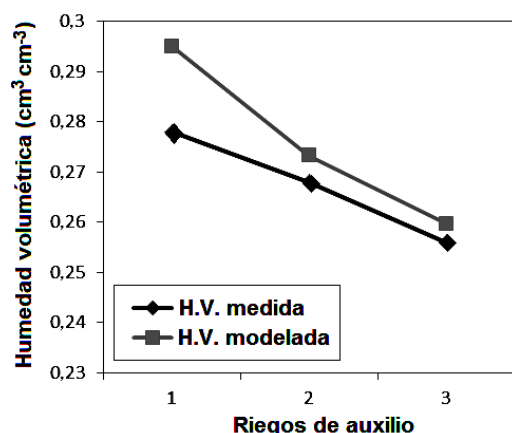


Figura 2. Comparación de la humedad volumétrica del suelo medida y modelada antes de los riegos de auxilio en la localidad CEVAF.

La temperatura media del suelo tomada durante el periodo de siembra a emergencia en la localidad CEVAF fue de $17,7^\circ\text{C}$, presentándose la emergencia a los 23 DDS con una acumulación de 117,8

GDA calculados con la temperatura del suelo. Considerando solo la temperatura del aire el modelo estimó 52,7 *GDA* de siembra a emergencia, valor similar a lo reportado por Angeloni *et al.* (1998) quienes estimaron un rango de 50-60 *GDA* para el mismo periodo. La diferencia de *GDA* calculados con temperatura del suelo y aire se debió a que la temperatura del aire fue menor a la temperatura del suelo al momento del muestreo.

En la Tabla 4 se presenta un resumen de riegos de auxilio aplicados y la etapa en la que fueron aplicados en la parcela experimental CEVAF.

Tabla 4

Calendario de riegos aplicados en la localidad CEVAF

No. de Riego	Fecha	Días al riego	Intervalo de riego (días)	GDA	Etapa
1	28/02/2012	49	49	182,70	Desarrollo Vegetativo
2	01/05/2012	112	62	643,08	Botón Floral
3	06/06/2012	148	35	1108,11	Bellota

Los rendimientos obtenidos en los tres lotes experimentales muestran que la fecha de siembra del mes de Enero tuvo mayor rendimiento que la fecha de siembra del mes de Noviembre. También se observa que en las cinco variedades se mantuvo esta tendencia, como lo muestra la figura 3; en los tres lotes la variedad convencional DP393 mostró mejor rendimiento.

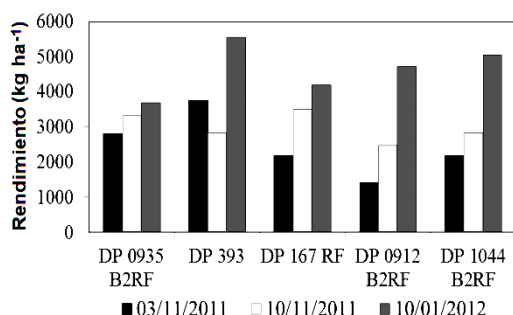


Figura 3. Rendimientos de cinco variedades de algodón en tres fecha de siembra de tres localidades en el norte de Sinaloa, México.

Para calibrar el modelo integral de programación del riego, se usaron los valores contenidos en los parámetros de la Tabla 5, los cuales posteriormente fueron nuevamente utilizados en la macro de Excel para realizar la programación del riego en el cultivo del algodón, algunos de los cuales fueron tomados de literatura como los valores de K_c mencionados por Doorenbos y Pruitt (2000) y otros fueron calculados mediante el análisis de los datos generados en el lote experimental del CEVAF.

Una vez calibrada la macro de Excel para programación del riego se realizaron simulaciones para diferentes fechas de siembra obteniendo los datos presentes en

la Tabla 6, la cual muestra que la fecha con menor requerimiento hídrico es el mes de Julio y el de mayor demanda el mes de Octubre debido al alargamiento del ciclo fenológico por bajas temperaturas y menor evapotranspiración. También se puede observar que en el mes de Enero se muestra el último riego cerca de madurez fisiológica considerando que se tiene humedad disponible en el suelo el cual se podría omitir. En la columna “Nº de riegos” también se contempla el riego de asiento o de germinación. En la Tabla 7 se muestran los datos modificados de la Tabla 6 eliminando el último riego de auxilio reduciendo el consumo de agua en todas las fechas pero a su vez provocando que el cultivo llegara casi a Punto de Marchitez Permanente (*PMP*) para el final de su ciclo y en algunos casos como en el mes de Septiembre y Noviembre los valores de humedad ya había llegado a *PMP*. Los valores modelados de la tabla 6 consideran un criterio de 100 por ciento de bellotas abiertas (2400 *GDA*) en madurez fisiológica. Para cosecha se puede tomar un criterio del 80 por ciento de bellotas abiertas con la cual esta calendarización tendría validez ya que disminuiría la cantidad de agua por aportar y el estrés hídrico al momento de la cosecha.

Tabla 5

Modelos con parámetros calibrados para la programación integral del riego en el cultivo del algodón para el Distrito de Riego 075, norte de Sinaloa, México

Variable	Modelo	Parámetro
Coefficiente de cultivo	$K_c = K_{\max} \operatorname{erfc}\left(\frac{x - x_{K_{\max}}}{\alpha_1}\right)^2$ <p>si $K_c < K_{co}$, entonces $K_c = K_{co}$</p>	$K_{\max}=1,25$ $x_{K_{\max}}=0,45$ $\alpha_1=0,45$ $K_{co}=0,2$
Profundidad radical	$P_r = P_{ro} + (P_{r_{\max}} - P_{ro}) \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{(GDA_n)^2}{\alpha_2^2}\right] \right\}$	$P_{ro}=0,07$ $P_{r_{\max}}=1,2$ $\alpha_2=400$
Factor de abatimiento	$f_n = \alpha_3 - \alpha_4 K_{cn}$	$\alpha_3=0,85$ $\alpha_4=0,1$

Tabla 6

Requerimientos hídricos modelados en algodónero para diferentes fechas de siembra sin restricción del último riego

Fecha de siembra	Duración del ciclo (días)	ET_o (mm)	ET_r (mm)	No. de riegos	Días al último riego	GDA al último riego	Humedad del suelo a madurez fisiológica (cm^3/cm^3)	Humedad del suelo a PMP (cm^3/cm^3)
15 Julio	211	847,93	505,62	4	105	1736,73	0,325	0,244
15 Agosto	257	1011,10	612,32	5	209	2030,03	0,362	0,244
15 Septiembre	267	1098,97	789,09	6	214	1772,28	0,318	0,244
15 Octubre	269	1120,64	869,63	7	238	1907,08	0,362	0,244
15 Noviembre	266	1130,69	782,75	6	208	1451,12	0,277	0,244
15 Diciembre	247	1098,04	718,87	6	202	1648,21	0,327	0,244
15 Enero	222	1054,27	688,36	6	210	2198,28	0,391	0,244

Tabla 7

Valores modificados de requerimientos hídricos modelados para diferentes fechas de siembra con restricción del último riego

Fecha de siembra	Duración del ciclo (días)	ET_o (mm)	ET_r (mm)	No. de riegos	Días al último riego	GDA al último riego	Humedad del suelo a madurez Fisiológica (cm^3/cm^3)	Humedad del suelo a PMP (cm^3/cm^3)
15 Julio	211	847,93	457,11	3	74	1196,84	0,245	0,244
15 Agosto	257	1011,10	591,08	4	116	1652,56	0,252	0,244
15 Septiembre	267	1098,97	731,66	5	169	1476,60	0,244	0,244
15 Octubre	269	1120,64	850,16	6	202	1436,43	0,254	0,244
15 Noviembre	266	1130,69	683,74	5	185	1126,71	0,244	0,244
15 Diciembre	247	1098,09	675,88	5	176	1234,66	0,245	0,244
15 Enero	222	1054,27	683,31	5	158	1335,58	0,264	0,244

Desde el punto de vista hídrico las fechas de Julio y Agosto podrían considerarse como posibles fechas de siembra por la baja demanda de agua del cultivo aunque hay que considerar otros factores que intervienen como son las condiciones fitosanitarias como la presencia de plagas, entre las que destacan el picudo del algodónero (*Anthonomus grandis*) y lepidópteros del follaje que pueden ser problemas fuertes en época de verano. Septiembre, Octubre y Noviembre demandan una lámina de agua elevada por alargamiento del ciclo, además de haber una amplia ventana de cultivo favoreciendo al ataque de plagas y enfermedades. Diciembre y Enero muestran ser mejores opciones de siembra por los requerimientos hídricos intermedios y por la presencia baja de plagas como pulgones en las primeras etapas de su desarrollo y al no presentarse problemas de picudo de acuerdo a lo observado en la parcela experimental CEVAF sembrada en esa fecha.

El criterio para la aplicación del último riego en estos experimentos se determinó de acuerdo a los GDA y a la humedad del suelo a madurez fisiológica, estimando que es recomendable que la humedad del suelo no llegue a PMP antes que la planta tenga un 80 por ciento de bellotas abiertas y que el valor de GDA para aplicar el último riego sea de 1700 a 1800. Si el modelo proporciona una recomendación del último riego con un valor mayor a los 1800 GDA se debe tomar en cuenta el mes de siembra ya que si al final del ciclo es un mes cálido aumentara la evapotranspiración del cultivo consumiendo más rápidamente la humedad del suelo.

Adicionalmente con los datos obtenidos se pudo generar un plan de riegos a diferentes niveles de operación y administración del agua de riego (toma-granja, módulo y presa) considerando las eficiencias de aplicación y conducción en cada nivel de operación para el distrito de riego 075 (Tabla 8).

Tabla 8

Láminas de agua estimadas con un modelo de programación integral para el cultivo de algodónero, en diferentes fechas de siembra y niveles de operación del Distrito de Riego 075 (mm)

Fecha de siembra	Requerimiento de riego	Nivel de operación		
		Toma	Módulo	Presa
15-Jul	505,62	887,06	1043,60	1159,55
15-Ago	612,32	1074,25	1263,82	1404,24
15-Sep	789,09	1384,37	1628,67	1809,63
15-Oct	869,63	525,67	1794,90	1994,33
15-Nov	782,75	1373,25	1615,59	1795,10
15-Dic	718,87	1261,18	1483,75	1648,61
15-Ene	688,36	1207,66	1420,77	1578,64

4. Conclusiones

Se cuenta con un modelo integral para programación del riego calibrado para el cultivo de algodónero en el norte de Sinaloa, México, útil para la elaboración de planes de riego en diferentes fechas de siembra, suelos, clima y diferentes niveles de operación hidráulica. Los requerimientos hídricos modelados para el cultivo del algodónero en siembras de Julio a Enero estuvieron dentro del rango de 500 a 869 mm sin restricción del último riego, mostrando su valor mínimo en siembras del 15/07 y su máximo en siembras del 15/10, valores que están dentro del rango (500 a 1200 mm) reportado por Jordan (1982) y por Biorai *et al.* (1983).

El último riego debe aplicarse si la humedad del suelo modelada no llega a PMP antes que la planta tenga un 80 por ciento de bellotas abiertas y que coincida con los 1700-1800 *GDA*. Si el modelo recomienda aplicar el último riego con un valor mayor a los 1800 *GDA* se debe tomar en cuenta el mes de siembra ya que si al final del ciclo aumenta la evapotranspiración del cultivo, el abatimiento de la humedad del suelo será más rápido. La eliminación del último riego reduce los requerimientos hídricos a 450 en Julio y 850 mm en Octubre.

Desde el punto de vista hídrico las mejores fechas de siembra fueron Julio y Agosto por su bajo consumo de agua, sin embargo desde el punto de vista sanitario estas son

las peores, por lo que se recomienda Diciembre y Enero como mejores opciones por requerimientos hídricos intermedios, mejores rendimientos y baja o nula presencia plagas. El modelo es una excelente herramienta para la gestión de zonas de riego útil en la adaptación del cultivo al cambio climático, es importante continuar con trabajos similares para incrementar la precisión del modelo.

5. Referencias bibliográficas

- Allen, R. G.; Gichuki, F. N.; and Resenzweigh, C. 1991. CO₂ Induced climatic changes and irrigation water requirements. *J. water resources planning and manage.* 117: 157-158.
- Angeloni, P.; Caram, G.; Prause, J.; Fernandez, H. 1998. Fenología de Algodón: Acumulación de Días Grado en Avia-Terai (Chaco). Cátedra de Climatología. Facultad de Ciencias Agrarias –UNNE.
- ASERCA (Apoyos y Servicios a la Comercialización Agropecuaria) 2002. Mercado internacional de algodón. Dirección de Análisis y Estudios de Mercado. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca. México, D. F.
- Barboza, D. S.; Ferreira, J. A.; Rammana, T. V.; Rodríguez, V. P. 2007. Crop water stress index and water use efficiency for melon (*cucumid melo* L.) on different irrigation regimes. *Agricultural Journal* 2 (1): 31-37.
- Baskerville, G. L.; Emin. P. 1969. Rapid estimation of heat accumulation from maximum and minimum temperatures. *Ecology* 50: 514-517.
- Doorenbos, J.; Pruitt, W. O. 2000. Crop water requirements. FAO paper 24. Roma, Italia. 144-146.
- Enríquez, M.; Segura C. M.; Preciado, Pablo.; Orozco V. J.; Yescas C. P.; Ávila, C. 2007. Producción de algodón en doble y triple hilera con riego por goteo sub-superficial. *TERRA Latino Americana* 25: 155-161.
- Erie, L. J.; French, O. F.; Bucks, D. A.; Harris, K. 1981. Consumptive use of water by major crops in the southwestern united states. United States Department of Agriculture, Conservation Research Report 29: 6.
- Fundación Produce Sinaloa. 2007. Algodón: Marco de Referencia.1: 01.
- Gómez, J. G. 2000. Algodón. En: *Agro-Síntesis*. México, D. F. 9-13.
- Herrera, J L.; López, F.; Valenzuela, J. A.; Machain, M. 2002. Guía para producir algodón en el Valle de Mexicali, B.C y San Luis Rio Colorado, Son. INIFAP, Campo Experimental de Mexicali, CIR-NOROESTE, SAGARPA 1-20.
- Krieg, D. R. 1998. Irrigation Technology. In: *Proceedings Belt wide cotton Conferences*. San Diego, CA. National Cotton Council of America. 1:14-15.

- Martin E. 2001. Methods for determining when to Irrigate. Bulletin Extension AZ1220. The University of Arizona. Disponible en: <http://www.ag.arizona.edu/pubs/water/az1220>.
- Méndez-Natera, J. R.; Lara, L.; Gil-Marín, J. A. 2007. Efecto del Riego por goteo en el crecimiento inicial de tres cultivares de algodón *Gossypium hirsutum* L. DESIA (Chile) 25: 7-15.
- Montero, M.; Pérez, J. L. 2008. Regionalización de proyecciones climáticas en México de precipitaciones y temperaturas en superficie usando el método REA para el siglo XXI. In: Martínez, P y Aguilar, A (eds.). Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 11-21.
- Ojeda, B.W.; Sifuentes, I. E.; Slack, D.; Carrillo, M. 2004. Generalization of irrigation scheduling parameters using the growing degree day's concept: application to a potato crop. In: Irrigation and Drainage. 53:521-261.
- Ojeda, B.W.; Sifuentes, I. E.; Unland, W.H. 2006. Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa. Agrociencias 40: 13-25.
- Silvertooth, J. C. 2001. Deciding on the Final Irrigation. Bulletin extension AZ1212. The University of Arizona. <http://www.ag.arizona.edu/pubs/crops/az1212.pdf>.
- Steger A.J.; Silvertooth, J. C.; Brown, P. 1998. Upland cotton growth and yield response to timing the initial post-plant irrigation. Agronomy J. 90:445-461.