

MODELO INTEGRAL PARA LA PROGRAMACION, MANEJO Y GESTION DEL RIEGO EN MAÍZ COMO APOYO PARA LA MITIGACIÓN DE SEQUIAS EN EL NORTE DE SINALOA

Sifuentes Ibarra Ernesto, Macías Cervantes Jaime, Quintana Quiroz José Guadalupe y Corral Vega Rosendo Abel

CURRICULUM VITAE DE AUTORES

Ernesto Sifuentes Ibarra. Ing. Agrónomo especialista en maquinaria agrícola egresado de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en Saltillo, Coahuila en 1992, con maestría en Suelos en la misma Institución en 1995. Experiencia en manejo de sistemas de riego y fertirriego. De 1996 a 1997 encargado del desarrollo y adaptación del sistema de pronóstico de riego en tiempo real en el Valle del Carrizo, Sinaloa. De 1997 a 2004 responsable del desarrollo y transferencia del sistema de pronóstico de tiempo real en el Valle del Fuerte. Actualmente es investigador en Uso y Manejo del Agua en el INIFAP-CEVAF. Cuenta con publicaciones nacionales e internacionales con temas relacionados con el riego.

Jaime Macías Cervantes. Es ingeniero Agrónomo en suelos por la Universidad Autónoma agraria Antonio Narro, en Saltillo Coah. (1980-1984), con Maestría en Ciencias por el Centro de Edafología en el Colegio de Postgraduados en Montecillos Edo. De México (1987-1989). Es Investigador en el Programa Sistemas Agrícolas de Producción en el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias y Forestales (INIFAP) en las áreas de fertilidad, labranza, modelaje, agricultura de precisión y sistemas de siembra intensivos. Recibió felicitación al trabajo de tesis de Maestría y fue candidato a Investigador Nacional por el Sistema Nacional de Investigadores (SIN). CONACYT de 1989 a 1993. Ha obtenido en dos ocasiones el Reconocimiento por parte de la Asociación de agricultores del Río Fuerte Sur, en Los Mochis, Sin., con el PREMIO TECNOAGRO en el año de 1999 y 2009. Ha sido asesor de dos tesis a nivel de licenciatura.

José Guadalupe Quintana Quiroz. Es Ingeniero agrónomo por el Instituto Tecnológico del Valle del Yaqui (2001-2005), con maestría de la Universidad de Sonora (2006-2008). Trabaja en el INIFAP, Campo Experimental Valle del Fuerte, desde octubre de 2008. Es investigador asociado “B” de la Red de Modelaje. Actualmente participa en activo como colaborador del proyecto Uso de sensores infrarrojos para incrementar la eficiencia de los fertilizantes en México, en colaboración con CIMMYT, proyecto financiado por Gobierno federal a través de la SAGARPA, así como en el proyecto de labranza de conservación financiado por el gobierno federal como parte del convenio INIFAP-INTA con el gobierno argentino.

Rosendo Abel Corral Vega Es ingeniero agrónomo egresado de la Escuela Superior de Agricultura del Valle del Fuerte de la Universidad Autónoma de Sinaloa, en la carrera de Licenciatura en Ingeniería Agronómica con especialidad en Suelos e Irrigación, coautor de artículos científicos como: “Manejo integral de tres técnicas parcelarias de riego por gravedad con tubería multicompuertas en el cultivo de maíz, en el Valle del Fuerte”, “Fluctuación poblacional de la palomilla de la papa (*Phthorimaea operculella*), bajo condiciones de cambio climático en el norte de Sinaloa”, “Acciones de adaptación al cambio climático del maíz de riego en el Valle del Fuerte”. Actualmente colaborador en proyectos de investigación en el INIFAP en Campo Experimental del Valle del Fuerte (CEVAF).

RESUMEN

El estado de Sinaloa es el principal productor de maíz a nivel nacional con una producción de más de 5 millones de toneladas anuales, sin embargo, cada vez es más frecuente que la actividad agrícola en este estado se vea amenazada por eventos climáticos extremos como sequías y heladas alterando los ciclos fenológicos de los cultivos y el manejo de los factores de la producción como el riego; cuya eficiencia en el estado de Sinaloa es tan solo del 40 al 50%.

La situación actual de baja disponibilidad de agua para el ciclo 2011-2012, obligó a reducir el número de riegos, de un calendario tradicional de 4 y 5 riegos de auxilio, para afectar lo menos posible la superficie a establecer sin reducción importante del rendimiento. Para afrontar este escenario se desarrolló un modelo integral de programación del riego para maíz en función de Grados Día crecimiento aplicado a través de una plataforma computacional por internet, validada en el ciclo OI 2010-2011 en el norte de Sinaloa.

Como resultados de la validación del modelo en el ciclo OI 2010-2011 se generó una calendarización de 3 riegos de auxilio aun cuando la resiembra se realizó en el mes de febrero del 2011 cuyas condiciones climáticas son menos favorables respecto a las de octubre y noviembre. En estas condiciones se obtuvieron eficiencias de aplicación del 60 al 80% en riego por gravedad y 95% en goteo. Considerando que la eficiencia promedio de la zona para maíz bajo riego por gravedad es de 45% (de los 10000 m³ ha⁻¹ que se le aplican solo aprovecha 4500), significa un ahorro de agua de 1500 a 3500 m³ por hectárea en riego por gravedad con los cuales es posible asegurar la superficie ya establecida o incrementar la superficie en un 20% con el mismo cultivo u otros, o bien generar un banco de agua para escenarios de sequía.

Se cuenta con una plataforma robusta y versátil con un programa computacional y un modelo integral que permite la calendarización y pronóstico preciso del riego para diferentes fechas de siembra y texturas de suelo, utilizando información climática en tiempo real emitida por la red estatal de estaciones agro-meteorológicas. La plataforma se puede aplicar desde cualquier sitio por su fácil acceso y operación a través de la red de internet y permite agregar una base de datos climática personalizada según la necesidad de cada productor.

El sistema también contribuye a mejorar el servicio de riego de los módulos hacia el usuario ya que el supervisor de riego podrá elaborar los programas semanales de riego en forma más eficiente. Se cuenta con una excelente herramienta para reducir los efectos negativos de eventos extremos como sequías prolongadas y heladas, representando también una opción de adaptación al cambio climático.

En el presente ciclo otoño-invierno 2011-12, como resultado de la campaña de difusión y capacitación, sumado al apoyo y seguimiento de los módulos de riego, se ha logrado aplicar las recomendaciones de riego generadas con el modelo y la plataforma en aproximadamente 136000 ha con maíz en el norte de Sinaloa que representan el 70% de la superficie total establecida con amplias expectativas de obtención de rendimientos aceptables.

INTRODUCCIÓN

El maíz es por mucho el cultivo agrícola más importante de México desde el punto de vista alimentario, industrial, político y social. La superficie sembrada promedio anual es de 8.4 millones de hectáreas, de las cuales el 85.5% es de temporal (7,2 millones de hectáreas), mientras que 1 millón 217 mil hectáreas se siembran bajo condiciones de riego (14.5%), de las cuales Sinaloa es el principal productor al establecer anualmente alrededor de 500,000 ha con una producción de más de 5 millones de toneladas (CONAGUA, 2008) Aunque México es uno de los principales productores de maíz a nivel mundial, sus requerimientos de maíz son superiores a su producción, por lo que es uno de los principales países importadores con más de 7 millones de toneladas anuales (SIAP-SAGARPA, 2009).

En los últimos años se ha observado alta variabilidad climática en el norte de Sinaloa, provocado alteraciones considerables en los ciclos fenológicos de los cultivos e incremento en la presencia de eventos extremos sequías y heladas. Ante tal situación cada vez es menos preciso el manejo tradicional de los cultivos principalmente el riego y nutrición, haciéndose necesario tecnologías que permitan adaptar el manejo de los cultivos a los nuevos escenarios climáticos (Ojeda, 2008). Con el desarrollo de las comunicaciones (Internet) y la informática, actualmente es posible generar aplicaciones agrícolas prácticas para los productores a través de modelos agroclimáticos para riego, plagas, enfermedades y otros, ya que cada vez estos tienen más acceso a dichos medios. A través de Internet es posible tener acceso a datos climáticos en tiempo real de cualquier parte del mundo, desarrollar sistemas computacionales operados vía Internet e interactuar con varios tipos de usuarios en forma simultánea (Ojeda *et al.*, 2006).

La ventaja de estas herramientas con respecto al método tradicional es que el productor de una manera sencilla aplica modelos de programación integral y gestión del riego en tiempo real que le permite en forma anticipada programar sus riegos. Otra ventaja es que la eficiencia de los riegos y fertilizantes se incrementa ya que es posible mantener niveles óptimos de humedad y existe la posibilidad de reducir las cantidades de fertilizantes nitrogenados (Sifuentes, 2007).

La situación actual de baja disponibilidad de agua para el ciclo 2011-2012 en norte de Sinaloa, obligó a reducir el número de riegos para afectar lo menos posible la superficie a establecer sin reducción importante del rendimiento. Para afrontar este escenario se desarrolló y aplicó una plataforma computacional, vía internet, con un modelo integral de programación del riego para maíz en función de grados día crecimiento, validada en el ciclo OI 2010-11.

ESTUDIOS PRELIMINARES

Efectos del clima en la fenología

Para medir la edad fisiológica se utiliza la acumulación de Grados Día relacionada con la aparición de cada fase de desarrollo, las cuales difieren para cada variedad (Jefferies, 1991), es decir, los estados de desarrollo casi siempre se presentan porque estos se acumulan independientemente de la fecha de siembra y del año, mientras que los días calendario muestran una amplia variación. La estimación diaria de estos requiere del conocimiento de la temperatura media ambiental diaria (T_a) de acuerdo con las siguientes ecuaciones (Ojeda *et al.*, 2006).

$$\begin{aligned} \text{°D} &= T_a - T_{c\text{-min}}, \text{ si } T_a < T_{c\text{-max}} \\ \text{°D} &= T_{c\text{-max}} - T_{c\text{-min}}, \text{ si } T_a \geq T_{c\text{-max}} \\ \text{°D} &= 0, \text{ si } T_a \leq T_{c\text{-min}} \end{aligned}$$

Donde $T_{c\text{-min}}$ y $T_{c\text{-max}}$ son las temperaturas críticas mínima y máxima del cultivo, que en el caso del maíz son 10 y 30 °C respectivamente.

Modelos de simulación de riego

La tecnología de pronóstico de riego en tiempo real se empieza a desarrollar a partir de 1996 en Sinaloa con el liderazgo del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y la participación de los módulos y distritos de riego del norte de Sinaloa hasta el 2004 (Ojeda *et al.*, 1999). Sin embargo, esta herramienta manejaba parámetros de calendarización del riego tomados de otras localidades y en función de días calendario, lo cual generaba discrepancias en las recomendaciones a nivel de productor, requiriendo además mayor investigación agronómica.

Ante esta situación se generó el primer modelo de programación integral del riego para papa en el valle del Fuerte, que utiliza los parámetros coeficiente de cultivo (K_c) usado en la estimación del requerimiento de agua diario, factor de abatimiento de la humedad aprovechable o de estrés hídrico (F) y profundidad de la raíz (Pr). Estos parámetros varían con la etapa fenológica del cultivo y están en función de los Grados Día Acumulados (GDA) que tienen la ventaja de acoplar las demandas de riego de los cultivos al clima y la fenología, con una mayor precisión respecto a usarlos en base a días después de siembra (Ojeda, 2004). En el año 2006 se hizo lo mismo para un híbrido común de maíz ciclo intermedio utilizando el sistema Bowen-balance de energía (Ojeda *et al.*, 2006), lográndose precisar la determinación de dichos parámetros para la calibración y validación del modelo.

Programación del riego en maíz con estrés hídrico: experiencia en el módulo Batequis (ciclo 2002-2003)

El riego es la única forma de reducir el estrés hídrico de los cultivos, sin embargo, cuando la disponibilidad de agua es baja se requieren implementar acciones para ajustar la demanda a la disponibilidad sin reducción o minimizar la pérdida de rendimiento. En el módulo de riego

Batequis, como en la mayoría de los módulos que conforman el distrito de riego 075, se asigna una lámina bruta a nivel de toma-granja de aproximadamente 90 cm ($9000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) para el cultivo de maíz cuya necesidad de riego o lámina neta es de 44 cm ($4400 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) para años normales. Sin embargo, para el ciclo otoño-invierno 2002-03 la disponibilidad de agua del módulo era casi 20% menor que la lámina normal, por lo que la lámina bruta asignada fue 72 cm. Para evitar una reducción en la superficie de maíz se generó un programa de riegos en condiciones de sequía, con la finalidad de reducir en un riego el total de los aplicados en condiciones normales.

Para minimizar el efecto negativo sobre el cultivo se corrieron varias simulaciones de programas de riego manualmente con hojas de cálculo y con parámetros de calendarización de riego expresados en días calendario, ajustados para asegurar una buena humedad durante los periodos de polinización y llenado de grano. En el Cuadro 1 se presentan los programas óptimos en dos condiciones de disponibilidad de agua (normal y escasez) para un suelo típico (franco-arcilloso) y fecha de siembra representativa del módulo Batequis (15/11/2002), considerando las necesidades de riego y fenología del cultivo, así como las condiciones climáticas de la zona.

Cuadro 1. Distribución de riegos por gravedad recomendados para maíz para suelos franco-arcillosos en el Valle del Fuerte, con dos escenarios de disponibilidad de agua.

Normal					Escasez			
Número de riegos	Ln (mm)	Lb (mm)	GDA	Etapas	Ln (mm)	Lb (mm)	GDA	Etapas
1	141	235	-80	Pre-siembra	141	235	-80	Pre-siembra
2	54	160	436	V6	72	160	500	V8-V10
3	74	160	616	VT	98	160	747	R1
4	86	160	819	R1	109	160	996	R3
5	91	160	1006	R3				
Total	446	875			420	715		

Ln=Lamina neta o requerimiento neto de agua; Lb= Lamina bruta; GDA= Grados Día Acumulado

La reducción de un riego de auxilio generó un ahorro de agua de $1300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ sin afectar significativamente los rendimientos usuales en el área del módulo. Esto indica que es posible generar programas de riego específicos de una zona de riego con diferentes escenarios de disponibilidad de agua, considerando las condiciones fenológicas, climáticas, y edáficas de las parcelas. Para el tipo de suelo franco-arcilloso predominante en la zona, es posible reducir en un riego el programa convencional de los agricultores, aplicando casi la misma lámina neta pero redistribuyendo los riegos considerando las etapas más sensibles del maíz al estrés hídrico, traduciéndose en grandes ahorros de agua.

Efecto del número de riegos en el rendimiento del maíz

Un trabajo experimental para evaluar el efecto del número de riegos sobre el rendimiento de grano (Macías, 2003) con fecha de siembra del 30/12/2002 conducido en el Campo Experimental Valle del Fuerte durante el mismo ciclo 2002-2003, confirmaron los resultados

obtenidos en el módulo Batequis. En el Cuadro 2 se muestran los resultados de dicho experimento, se puede observar que donde se aplicaron 3 y 4 riegos de auxilio no hubo diferencia significativa en rendimiento y que la fecha de siembra tardía exige un riego adicional, situación ya determinada con el programa computacional (Sifuentes et al., 2011).

Cuadro 2. Efecto del número de riegos con el rendimiento en el cultivo de maíz en el norte de Sinaloa (INIFAP-CIRNO-CEVAF)

Riegos aplicados (auxilio)	Días al riego	Etapas	Rendimiento (t ha ⁻¹)	Reducción de rendimiento (%)
2	66	V10-11 hojas	6.79	36.05
	94	Antesis		
3	66	V10-V11	9.73	8.42
	94	Antesis		
	113	Grano lechoso		
4	59	V8-V9	9.8	7.7
	78	V13		
	94	Antesis		
	113	Grano Acuoso-lechoso		
5	44	V6	10.62	0
	66	V10-V11		
	87	Inicio de espigamiento		
	113	Grano acuoso		
	131	Grano masoso		

Precipitación durante el ciclo: 30 mm

METODOLOGÍA

Desarrollo de una plataforma computacional con internet

Con el fin de aplicar los modelos de programación de riego, durante el ciclo 2008-2009 en el INIFAP-CEVAF y bajo el apoyo de FPS, se desarrolló una plataforma computacional y un programa de cómputo a través de internet para la aplicación del modelo integral de programación de riego en los diferentes cultivos. La plataforma se compone por tres elementos: 1) enlace climático en tiempo real con la red agroclimática del estado de Sinaloa (administrada por el CIAD-Culiacán), 2) un portal electrónico cuyo servidor se encuentra y es administrado en el CEVAF, y 3) software IrriModel 1.0, el cual procesa modelos de programación integral del riego, bases de datos climáticas históricas y en tiempo real, bases de datos de texturas y características físicas e hidráulicas de los suelos, cultivos, sistemas de riego e imágenes. En la Figura 1 se muestra la arquitectura básica de la plataforma.

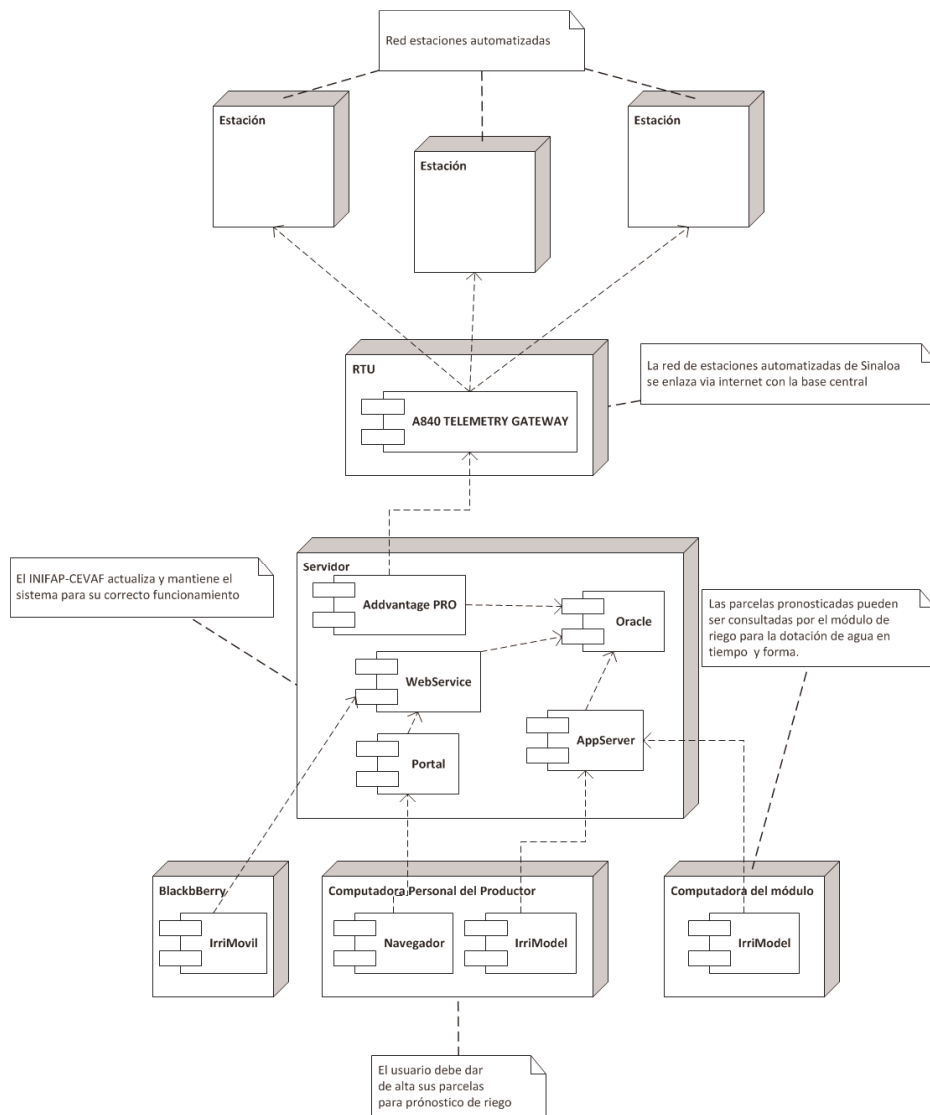


Figura 1. Diagrama que muestra los componentes básicos de la plataforma computacional

Para poder aplicar la tecnología, los usuarios que se integren al sistema deben estar conectados a Internet, ejecutar el programa **IrriModel 1.0** y dar de alta sus predios, especificando las características de suelo, fecha de siembra y cultivos. Permite además, agregar una base de datos climática personalizada, si el usuario cuenta con ella, situación que cobra más importancia en variables como la precipitación real o puntual registrada en sus predios por su relevancia en la estimación de las necesidades de riego, cuya distribución no es tan homogénea como la de otras variables como la temperatura o evapotranspiración. Después de lo anterior se está en condiciones de programar los riegos y enviar las solicitudes de los mismos al módulo correspondiente si así lo decide, para que el módulo elabore los programas de riego y volúmenes necesarios para que el productor disponga del agua en tiempo y forma.

Validación del modelo

La validación se realizó en el ciclo otoño-invierno 2010-2011 en una superficie de 2 ha bajo riego por gravedad (rodado) y 0.15 ha bajo riego por goteo, ambas ubicadas en el CEVAF; en forma paralela se condujeron trabajos en una parcela de 20 ha ubicada en el Ejido 1o. de mayo (Ahome) y otra de 12 ha en el módulo 3 Valle del Carrizo, ambas de productores cooperantes. Las características hidráulicas de estas parcelas se presentan en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Caracterización edáfica de las parcelas de validación del modelo integral de programación de riego para maíz en el norte de Sinaloa. Ciclo OI 2010-2011.

Parcela	Textura	CC (cm ³ cm ⁻³)	PMP (cm ³ cm ⁻³)	HA (cm ³ cm ⁻³)	MO (%)	DA (g cm ⁻³)
Cevaf (gravedad)	Arcilla	0.5129	0.3576	0.1552	1	1.1
Cevaf (goteo)	Arcilla	0.4158	0.2531	0.1626	1	1.1
Primero de mayo	Arcilla	0.4534	0.2905	0.1629	1	1.1
Valle del Carrizo	Arcilla	0.5129	0.3576	0.1552	1	1.1

CC= capacidad de campo; PMP= punto de marchitez permanente; HA= humedad aprovechable del suelo = CC-PMP; MO= materia orgánica y DA= densidad aparente

Las siembras se realizaron durante los meses de noviembre y diciembre en las cuatro parcelas de validación, sin embargo estas sufrieron daños totales debido a la helada del 4 de febrero del 2011, cuando se encontraba en la fase sexta hoja a hoja bandera. Después de la helada se decidió resembrar durante el mes de febrero. Las características de las parcelas establecidas se presentan el Cuadro 4.

Cuadro 4. Características de las siembras establecidas en parcelas de validación del modelo integral para programación de riego para maíz en el norte de Sinaloa. Ciclo OI 2010-2011

Parcela	Sup (ha)	Sistema de riego	Fecha de siembra	Híbrido	Distancia entre surcos (m)	Plantas por metro
CEVAF-gravedad	2.00	Gravedad	14/02/2011	P-2946W	0.80	8
CEVAF-goteo	0.15	Goteo	24/02/2011	P-3030	0.80	8
Ejido 1º. de mayo	20.00	Gravedad	8/02/2011	DK-2022	0.75	8
El Carrizo	12.00	Gravedad	14/02/2011	DK-2030	0.75	8
TOTAL	34.15					

Las variables evaluadas en las parcelas fueron: fenología, humedad del suelo, fecha y eficiencia de riego, rendimiento de grano e índice de cosecha y productividad del agua.

Calibración del modelo para condiciones de sequía

A partir que se conoció la disponibilidad de agua para riego en el sistema de presas para el presente ciclo OI 2011-2012, la cual fue de 40.34% (6012.1 millones de m³) a nivel estado, al día 25 de septiembre de 2011 (CONAGUA, 2011), insuficiente para el manejo tradicional de 4 a 5 riegos de auxilio y para evitar reducir la superficie a sembrar, se planteó la estrategia de

reducir el número de riegos sin que con ello se afectara de manera negativa el rendimiento del maíz.

Para afrontar esta situación, se calibró el modelo integral de programación de riego, para condiciones de escasez, mediante el ajuste del parámetro F (factor de abatimiento de la humedad aprovechable o estrés hídrico) del modelo generado en el 2006 (Ojeda et al., 2006) y validado en el ciclo 2010-2011 (Sifuentes et al., 2011).

Aplicación de la tecnología en condiciones de escasez: ciclo 2011-2012

A partir del mes de octubre del 2011 y a solicitud de diferentes dependencias gubernamentales, módulos de riego, organizaciones de productores, empresas privadas y productores particulares, se ha desarrollado una campaña de difusión mediante talleres y cursos de capacitación, prensa, televisión, radio y diversas publicaciones técnicas, para la concientización del uso racional del agua y aplicación de la calendarización de riegos generada por el modelo.

RESULTADOS

Como resultados de la validación del modelo en el ciclo OI 2010-2011 se generó una calendarización de 3 riegos de auxilio aun cuando la resiembra se realizó en el mes de febrero del 2011 cuyas condiciones climáticas son menos favorables respecto a las de octubre y noviembre. En estas condiciones se obtuvieron eficiencias de aplicación del 60 al 80% en riego por gravedad y 95% en goteo. Considerando que la eficiencia promedio de la zona para maíz bajo riego por gravedad es de 45% (de los 10000 m³ ha⁻¹ que se le aplican solo aprovecha 4500), significa un ahorro de agua de 1500 a 3500 m³ por hectárea en riego por gravedad con los cuales es posible asegurar la superficie ya establecida o incrementar la superficie en un 20% con el mismo cultivo u otros, o bien generar un banco de agua para escenarios de sequía. Los rendimientos obtenidos en la parcela de validación así como el uso y productividad del agua se muestran en el Cuadro 5.

Cuadro 1. Rendimiento y productividad del en parcelas de validación del modelo integral de programación del riego en maíz en el norte de Sinaloa Ciclo OI 2010-2011.

Parcela	Superficie (ha)	Lámina bruta Total (cm)	Volumen total (m³ ha⁻¹)	Rendimiento (Kg ha⁻¹)	Productividad del agua (Kg m⁻³)
CEVAF- gravedad	2	52.66	5266	10458	1.9
CEVAF- goteo	0.15	63.59	6359	13200	2.07
Ejido 1° de mayo	20	62.09	6209	11859	1.9
El Carrizo	12	72.9	7290	9000	1.2

En el presente ciclo otoño-invierno 2011-12, como resultado de la campaña de difusión y capacitación, sumado al apoyo y seguimiento de los módulos de riego, se ha logrado aplicar las recomendaciones de riego generadas con el modelo y la plataforma, en aproximadamente 136000 ha con maíz en el norte de Sinaloa que representan el 70% de la superficie total establecida.

Inspecciones realizadas por personal de módulos de riego, productores, agentes de cambio y técnicos de empresas privadas, entre otros, reportan un desarrollo normal del cultivo con niveles no perceptibles de afectación provocada por la restricción en la programación de riegos, con amplias expectativas de obtención de rendimientos aceptables.

CONCLUSIONES

Se cuenta con una plataforma robusta y versátil con un programa computacional y un modelo integral que permite la calendarización y pronóstico preciso del riego para diferentes fechas de siembra y texturas de suelo, utilizando información climática en tiempo real emitida por la red estatal de estaciones agro-meteorológicas.

La plataforma se puede aplicar desde cualquier sitio por su fácil acceso y operación a través de la red de internet y permite agregar una base de datos climática personalizada, si el usuario cuenta con ella, situación importante en variables como la lluvia registrada en sus predios, por su relevancia en la estimación de las necesidades de riego, cuya distribución no es tan homogénea como la temperatura y evapotranspiración.

La validación del modelo indicó la posibilidad de realizar ajustes en la calendarización y disminución del número de riegos de auxilio sin afectar significativamente los rendimientos.

Esta tecnología permite obtener eficiencias de aplicación del 60 al 80% en riego por gravedad y 95% en goteo, lo cual representa un ahorro de agua de 1500 a 3500 m³ por hectárea en riego por gravedad con los cuales es posible asegurar la superficie ya establecida o incrementar la superficie en un 20% con el mismo cultivo u otros, o bien generar un banco de agua para escenarios de sequía.

El sistema también contribuye a mejorar el servicio de riego de los módulos hacia el usuario ya que el supervisor de riego podrá elaborar los programas semanales de riego en forma más eficiente.

Se cuenta con una excelente herramienta para reducir los efectos negativos de eventos extremos como sequías prolongadas y heladas, representando también una opción de adaptación al cambio climático.

LITERATURA CONSULTADA

- Avery, E. R. 1983. Potato Diseases. Department of Botanic and Plant Pathology. University of New Hampshire. Durham New Hampshire, United Kingdom. 238p.
- Bongiovanni, R. y Lowenberg-DeBoer, J. Agricultura de Precisión y Sustentabilidad. 2001. [Consultado 04-2011]. Disponible en: <http://www.inta.gov.ar/bn/ph/info/documentos/artic08.htm>.
- Cappella, E. Colegio de Ingenieros Agrónomos de Costa Rica. La enseñanza de la Agromática: lecciones aprendidas durante diez años de experiencia en sistemas de posgrado en Costa Rica. En: XI Congreso Agronómico Nacional y de Recursos Naturales "el reto es producir y competir". Costa Rica. 1999. [Consultado 04-2011]. Disponible en: http://www.mag.go.cr/congreso_agronomico_xi/a50-6907-i_223.pdf.
- Centro de Agricultura de Precisión UC. Sistemas de Información Geográfica (SIG ó GIS). 2004. [Consultado 10-2004]. Disponible en: <http://www.capuc.puc.cl/sig.htm>.
- Cerna, N. TIC en la agricultura. Yachay, Revista Virtual. Infoductos y Telecomunicaciones del Perú, S.A. 2004. [Consultado 04-2010]. Disponible en: <http://www.yachay.com.pe/especiales/agricultura/dos.htm>.
- El Productor. Agricultura de Precisión: Conceptos Fundamentales. 2004. [Consultado 10-2004]. Disponible en: <http://www.revistaelproductor.com/julio2004/agriculturadeprecision.htm>.
- Exebio, G.A., Palacios, V.E., Mejía, S.E. y Carmona, V.R. 2005. Metodología para estimar pérdidas por infiltración en canales de tierra. SMCS.Terra Latinoamericana (23)2:213-223. México, D.F.
- FAO. 1986. Yield response to water. Irrigation and Drainage Paper No. 33. Roma, Italia. 189 pp.
- González, B. H. Informática y Agricultura. Centro de Telemática. Facultad de Agronomía. USAV, Guatemala. 2003. [Consultado 10-2004]. Disponible en: <http://www.iespana.es/byron/public/nfoagric.pdf>.
- Grenón, A. Universidad Nacional del Litoral de Argentina. Facultad de Ciencias Agrarias. Qué es la Agromática?. 2004. [Consultado 04-2011]. Disponible en: <http://fca.unl.edu.ar/agromatica/Definic.htm>.
- IMTA-INIFAP. 2011. Proyecto: Evaluación del Impacto del Cambio Climático en la Productividad de la Agricultura de Riego y Temporal del Estado de Sinaloa Informe Final. Cuernavaca Morelos. 390p.
- INTA. Jornadas de Agroinformática. 2008. [Consultado 04-2011]. Disponible en: <http://www.inta.gov.ar/actual/congreso/jaiio/trabajos.htm>.
- INTA. 1er Congreso Argentino de Agroinformática. 2009. [Consultado 04-2011]. Disponible en: <http://www.inta.gov.ar/actual/congreso/jaiio/trabajos09.htm>.

- INTA. 2° Congreso Argentino de Agroinformática. 2010. [Consultado 04-2011]. Disponible en: <<http://www.39jaiio.org.ar/node/86>>.
- IPCC. 2007. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del IPCC. Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (eds). Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). Ginebra. pp:104.
- Jefferies, R. A. & Lawson, H. M. 1991. A key for the stages of development of potato (*Solanum tuberosum*). Scottish Crop Research Institute, Invergowrie, Dundee, United Kingdom. *Ann. app. Biol.* 119: 387-389.
- Martin, E. C., D.C. Slack, and E.J. Pegelow. 1996. Crop Coefficients for vegetables in Central Arizona. In: *Proceedings of the International Conference. Evapotranspiration and Irrigation Scheduling*. Ame. Soc. of Agric. Eng. pp:381-386.
- Massieu Trigo, Yolanda Cristina 2004 *Aportes Revista de la Facultad de Economía Universidad Autónoma de Puebla Año IX, Número 16* Puebla, México
- Nakicenovic, N. and R. Swart. (eds) 2000. *Special Report on Emissions Scenarios*. Cambridge University Press. Cambridge, U.K. 612 pp.
- Ojeda, B.W., Sifuentes, I.E., Slack, D.C., y Carrillo, M. 2004. Generalization of irrigation scheduling parameters using the growing degree days concept: application to a potato crop. In: *Irrigation and Drainage*. 53:521-261. USA.
- Ojeda, B.W., Sifuentes, I.E. y Unland, W.H. 2006. Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa. *Agrociencias* 40: 13-25. Montecillos, Edo. México.
- Ojeda, W., P. Martínez, y L. Hernández. 2008. Repercusiones del cambio climático en la agricultura de riego. Capítulo 6 del libro “Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México”. Vol. II. Eds. A. Aguilar y P. Martínez. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Pérez, A. Milla M. y Mesa M. Impacto de las Tecnologías de la Información y la Comunicación en la Agricultura. *Revista Cultivos Tropicales*, 2006, vol. 27, no 1. [Consultado 04-2011]. Disponible en: <http://www.inca.edu.cu/otras_web/revista/pdf/2006/1/CT27113.pdf>.
- SAGARPA (SIAP), 2010. Avance mensual por cultivos por estado. México. <http://www.siap.gob.mx/>. Fecha de consulta: 26 de agosto de 2010.
- Seager, R., M. Ting, I. Held, Y. Kushnir, J. Lu, G. Vecchi, H. Huang, N. Harnik, A. Leetmaa, N. Lau, C. Li, J. Velez, N. Naik. 2007. Model projections of an imminent transition to a more arid climate in southwestern North America. *Science* 316: 1181-1184.
- Shayya, W. H., V.F. Bralts, and T.R. Olmstead. 1990. A general Irrigation Scheduling Package for Microcomputers. *Computers and Electronics in Agriculture*. Elsevier Scientific Publishing Co. Amsterdam, The Netherlands. 5:197-212

Sifuentes I. E., Macias C. J., Apodaca S. M. A. y Cortez M. E. 2009. Predicción de la fenología de papa (principios y aplicaciones prácticas). INIFAP-CIRNO. Campo Experimental Valle del Fuerte. Folleto Técnico No. 32. Los Mochis, Sinaloa, México. 54 p.

Sifuentes I. E., Macias C. J., Quintana, Q., J., Corral, V. R., González, C., V. y Ojeda, B. W. 2011. Tecnologías de riego bajo condiciones de escasez de agua en maíz. Fundación Produce Sinaloa. Culiacán, Sinaloa. 24pp.

Universidad Católica (UC) “Nuestra Señora de la Asunción” de Paraguay. Sistemas de Información Geográfica. 1999. [Consultado 04-2011]. Disponible en: <<http://www.dei.uc.edu.py/tai99/agricultura/agromatica/eda2.htm>>.

Universidad de California (UCLA). 2006. Integrated Pest Management for Potatoes in the Western United States. Agricultural and natural resources. Publicación 3316. Segunda edición. Oakland, California, EUA. 167p.