

SISTEMA EN LÍNEA PARA PROGRAMACIÓN DE RIEGO DE CHILE Y FRIJOL EN ZACATECAS



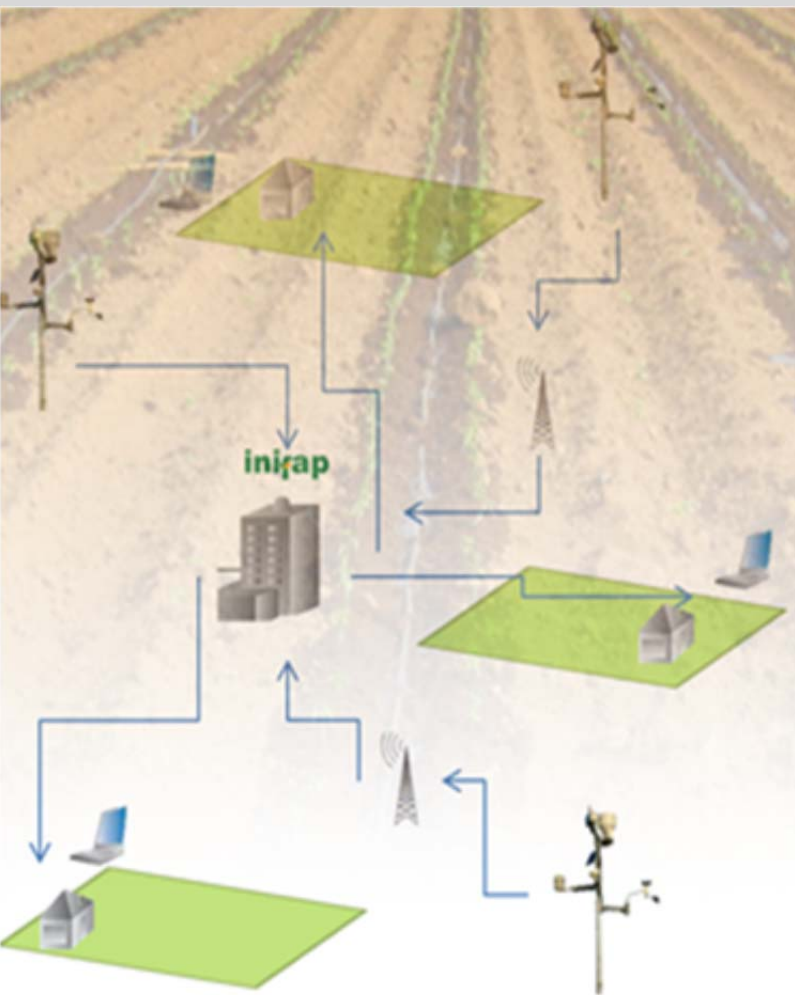
Miguel Servín Palestina
Guillermo Medina García
Israel Casas Flores
Ernesto A. Catalán Valencia

**GOBIERNO
FEDERAL**

SAGARPA

inifap

Instituto Nacional de Investigaciones
Forestales, Agrícolas y Pecuarias



CENTRO DE INVESTIGACIÓN REGIONAL NORTE CENTRO
CAMPO EXPERIMENTAL ZACATECAS

SECRETARIA DE AGRICULTURA, GANADERÍA, DESARROLLO RURAL, PESCA Y ALIMENTACIÓN

LIC. FRANCISCO JAVIER MAYORGA CASTAÑEDA

Secretario

MSc. MARIANO RUIZ-FUNES MACEDO

Subsecretario de Agricultura

ING. IGNACIO RIVERA RODRÍGUEZ

Subsecretario de Desarrollo Rural

ING. ERNESTO FERNÁNDEZ ARIAS

Subsecretario de Fomento a los Agronegocios

MSc. JESÚS ANTONIO BERUMEN PRECIADO

Oficial Mayor

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES FORESTALES, AGRÍCOLAS Y PECUARIAS

DR. PEDRO BRAJCICH GALLEGOS

Director General

DR. SALVADOR FERNÁNDEZ RIVERA

Coordinador de Investigación, Innovación y Vinculación

MSc. ARTURO CRUZ VÁZQUEZ

Coordinador de Planeación y Desarrollo

LIC. MARCIAL A. GARCÍA MORTEO

Coordinador de Administración y Sistemas

CENTRO DE INVESTIGACIÓN REGIONAL NORTE CENTRO

DR. HOMERO SALINAS GONZÁLEZ

Director Regional

DR. URIEL FIGUEROA VIRAMONTES

Director de Investigación

DR. JOSÉ VERÁSTEGUI CHÁVEZ

Director de Planeación y Desarrollo

LIC. DANIEL SANTILLÁN AGUILAR

Director de Administración

DR. FRANCISCO G. ECHAVARRÍA CHÁIREZ

Director de Coordinación y Vinculación en Zacatecas

SISTEMA EN LÍNEA PARA PROGRAMACIÓN DE RIEGO DE CHILE Y FRIJOL EN ZACATECAS

Ing. Miguel Servín Palestina¹
Dr. Guillermo Medina García¹
ISC. Israel Casas Flores²
Dr. Ernesto A. Catalán Valencia³

¹ Investigadores. Campo Experimental Zacatecas. INIFAP.

² Asistente técnico. Campo Experimental Zacatecas. INIFAP.

³ Investigador. CENID – RASPA. INIFAP.

SISTEMA EN LÍNEA PARA PROGRAMACIÓN DE RIEGO DE CHILE Y FRIJOL EN ZACATECAS

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias
Progreso No. 5,
Barrio de Santa Catarina
Delegación Coyoacán,
C.P. 04010 México, D.F.
Teléfono (55) 3871-7800

ISBN: 978-607-425-887-5

Primera edición 2012

No está permitida la reproducción total o parcial de esta publicación, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico, fotocopia por registro u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito de la Institución.

Cita correcta:

Servín, P. M., Medina, G. G. Casas I.F., Catalán E.V. 2012, Sistema en línea para programación de riego de chile y frijol en Zacatecas. Folleto Técnico No. 42. Campo Experimental Zacatecas. CIRNOC-INIFAP. 42p.

Contenido

INTRODUCCIÓN	1
EL AGUA DE RIEGO EN MÉXICO.....	3
PROGRAMACIÓN DEL RIEGO.....	5
MÉTODO DEL BALANCE DE AGUA EN EL SUELO.....	7
Precipitación efectiva	8
Riego	8
Escorrentía	10
Drenaje.....	10
Evapotranspiración	10
Determinación de la evapotranspiración.....	11
COEFICIENTE DEL CULTIVO.....	13
HUMEDAD APROVECHABLE	15
Capacidad de campo	16
Punto de marchitamiento permanente	17
CRITERIO PARA CALENDARIZACIÓN DE RIEGO	18
Abatimiento de humedad aprovechable	18
Días de la semana	20
LA RED DE MONITOREO AGROCLIMÁTICO	20
EL SISTEMA PARA LA PROGRAMACIÓN DE RIEGOS	23
Datos de entrada	23
Descripción de la aplicación	28
Reportes e interoperación de resultados	35
LITERATURA CITADA	37

INTRODUCCIÓN

La menor disponibilidad y contaminación del agua suponen un riesgo cada vez mayor para la agricultura, la cual es la actividad productiva de mayor consumo y dispendio de agua en el mundo. Consume más del 80% del agua disponible a nivel mundial, cifra que en nuestro país alcanza el 77%, con 6.3 millones de hectáreas bajo riego en las que la eficiencia en el uso del agua es menor al 50% (Sánchez *et al.*, 2002).

En Zacatecas se riegan más de 36 mil ha de chile y poco más de mil ha de frijol mediante bombeo de pozos profundos, generándose extracciones de agua de 288 y 6 millones de m³ respectivamente. Esta demanda de agua ejerce fuerte presión en los principales acuíferos del Estado, los cuales operan con déficits entre la recarga y la extracción de hasta 250%. Esto se ve reflejado en un abatimiento del manto freático con una tasa extracción de 1.18 m por año en promedio, lo cual ha incrementado los costos de energía hasta \$0.45 por m³ de agua extraído.

El conocimiento de las necesidades de agua de los cultivos es fundamental no sólo para mejorar, a través del riego, sus niveles de producción y calidad de las cosechas sino que contribuye también a ahorrar considerables volúmenes de agua (IMTA, 1995). Debido a que Zacatecas se sitúa en una región con alto déficit evapotranspirativo, la aplicación del riego

se hace necesaria para la producción de chile y frijol. Sin embargo, contar con un sistema de riego tecnificado no garantiza el ahorro de agua, puesto que además se necesita una buena programación de los riegos y un buen manejo y operación del sistema de riego. Por ejemplo, los sistemas de riego por goteo de Zacatecas operan con una eficiencia de aplicación menor al 85% debido a problemas de manejo.

La tecnificación del riego plantea tres preguntas básicas: cuánto, cuándo y cómo regar los cultivos para obtener máxima eficiencia y productividad del agua. La presente publicación se centra en las dos primeras interrogantes, es decir, en la cuantificación de las demandas hídricas de los cultivos y la determinación del momento oportuno para la aplicación de los riegos. Las respuestas a estas preguntas constituyen lo que se conoce como el “programa o calendario de riegos” (Catalán, *et al.* 2007).

En la programación de los riegos destaca la cuantificación de las necesidades hídricas de los cultivos que tienen su origen en los procesos de evaporación y transpiración. La medición de estos procesos por separado es difícil, por lo que se utiliza el término evapotranspiración para referirse de manera conjunta a la evaporación de agua que ocurre físicamente desde la superficie del suelo y a la que ocurre fisiológicamente desde la superficie de las hojas (FAO, 1977; FAO, 1989).

En esta publicación se describe un sistema en línea para estimar las demandas de agua y obtener el programa de riegos de los cultivos de frijol y chile en el estado de Zacatecas. Es una versión que se consulta vía internet en <http://www.zacatecas.inifap.gob.mx> y que se abastece de los datos obtenidos por la red de estaciones agroclimáticas distribuidas en el Estado.

EL AGUA DE RIEGO EN MÉXICO

La fuente principal de agua, para el desarrollo de las diferentes actividades de la población mexicana, son los acuíferos. El incremento continuo de la profundidad de bombeo tiene consecuencias económicas por el incremento constante de los costos de energía y las inversiones recurrentes en adecuaciones a la capacidad de bombeo. Esto impacta negativamente a los pequeños productores, ya que carecen de capacidad económica y tecnológica para adaptarse a un entorno competitivo de uso eficiente del agua del subsuelo. Además de lo anterior, los abatimientos de los mantos acuíferos producen, en términos ambientales, la destrucción del hábitat por restricciones en agua disponible, desaparición o disminución de la cubierta vegetal, pérdida de fauna silvestre y aumento de la erosión del suelo. En el estado de Zacatecas, existen 34 acuíferos donde más del 55% se encuentran sobre explotados; con esos acuíferos se irrigan más de 130 mil hectáreas de cultivo (Mojarro *et al* 2011). Se resalta el

desconocimiento de la sociedad, en general, sobre la abundancia, contaminación, planeación, manejo y protección de las aguas subterráneas.

Los problemas asociados con la disponibilidad y aprovechamiento del agua afectan tanto a la agricultura de riego como a la de temporal. De los 6.3 millones de hectáreas bajo riego, sólo 450 mil cuentan con alta tecnificación y el resto opera bajo métodos tradicionales de irrigación con eficiencias no mayores al 50 por ciento (Sánchez *et al.*, 2002). Por su parte, el 68 por ciento de los 14 millones de hectáreas de temporal operan bajo condiciones de riesgo debido a la incertidumbre climática. Otro problema añadido a la disponibilidad del agua es la salinidad de los suelos, habiendo en el país 400 mil hectáreas bajo esta condición (Sánchez, 2005). La Figura 1 señala la distribución del déficit evapotranspirativo en el territorio nacional.

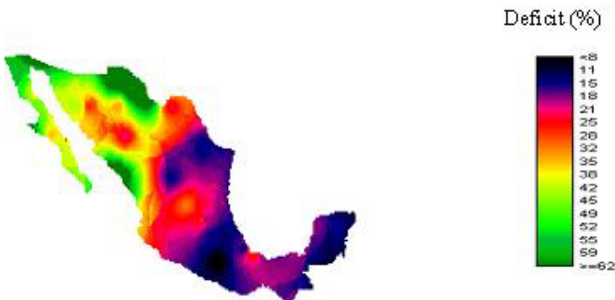


Figura 1. Déficit evapotranspirativo en México. Fuente: Sánchez *et al.* (2006).

PROGRAMACIÓN DEL RIEGO

La programación del riego es un proceso de decisión orientado a determinar las cantidades de agua por aplicar y las fechas de aplicación de cada riego para minimizar deficiencias o excesos de humedad en el suelo que pudieran causar efectos adversos sobre el crecimiento, rendimiento y calidad de los cultivos. Con la programación adecuada del riego se pueden lograr objetivos múltiples como ahorrar agua, disminuir costos por ahorro de energía y mano de obra, minimizar estrés hídrico y maximizar rendimiento, así como maximizar calidad, rentabilidad o ingreso(Catalán, *et al.* 2007).

La programación del riego es una técnica que permite determinar el nivel óptimo de riego de acuerdo a las interacciones específicas de suelo, cultivo, clima y manejo agronómico (Ortega y Acevedo 1999, Palacios y Martínez 1978, Mojarro 2004). Responde a dos preguntas fundamentales: ¿Cuánto y cuándo regar?, es decir, debe permitir conocer las dosis y frecuencias de riego. Salvo en algunas instalaciones altamente tecnificadas, en las que estas decisiones se toman en forma automática, lo normal es que se haga una programación anticipada, según la experiencia y conocimiento del agricultor, suponiendo que el año se comportará como el año promedio. Después a lo largo de la campaña, los parámetros de riego se van corrigiendo en

función de información actual: factores climáticos, desarrollo del cultivo y disponibilidad de agua (Maldonado, 2000).

En la programación de riego la tendencia es que cada vez intervengan menos factores subjetivos y se logre mayor eficiencia en el manejo del agua. Siguiendo esta tendencia se han desarrollado distintos métodos para programar los riegos, los cuales pueden agruparse en tres categorías: parámetros climáticos, medidas de humedad del suelo y medidas de estrés hídrico de las plantas (FAO, 1989). En el orden en que se han citado, los métodos van de menos a más rigurosos. Desgraciadamente, la facilidad de aplicación de los métodos va en orden inverso.

Los métodos más utilizados para realizar la programación del riego son: los que se basan en la medición y monitoreo, en el suelo o las plantas, de algunas variables relacionadas con el estrés hídrico del cultivo, y los que se basan en el balance de la humedad en el suelo (Buchner *et al.*, 1994). Los métodos del primer tipo se apoyan en el uso de sensores para medir variables como el contenido de humedad, tensión de humedad y resistencia eléctrica del suelo, o bien, temperatura del follaje (Giuliani *et al.*, 2001). Por su parte, el método del balance de la humedad en el suelo se basa en la estimación de las entradas y salidas de agua en el perfil del suelo ocupado por las raíces del cultivo.

MÉTODO DEL BALANCE DE AGUA EN EL SUELO

Para un volumen dado de suelo durante un cierto periodo de tiempo, la diferencia entre la cantidad de agua añadida y la cantidad de agua perdida (Castro, 2005 y Torres *et al*, 1996), es igual a la variación del contenido de humedad ($\Delta\theta$) en dicho volumen de suelo y puede expresarse como:

$$\text{Entradas} - \text{Salidas} = \Delta\theta \quad (1)$$

Cuando las entradas exceden a las salidas, la variación de contenido de humedad es positiva y en caso contrario, negativa.

Las ganancias o **entradas** de agua más importantes son la precipitación efectiva (Pe) y el riego (R).

$$\text{Entradas} = Pe + R \quad (2)$$

Las **pérdidas** de agua se deben a los procesos de escorrentía (E), drenaje (D) y a la evapotranspiración (ET) o consumo de agua por parte de las plantas.

$$\text{Salidas} = E + D + ET \quad (3)$$

Precipitación efectiva

La precipitación efectiva (P_e) es el porcentaje de agua de lluvia (Precipitación ó P_p) aprovechada por las plantas, ya que una parte de la lluvia se pierde por evaporación o escurrimiento y no se encuentra disponible para las plantas. Debido a la complejidad de estos procesos, la lluvia efectiva se estima mediante funciones empíricas derivadas de análisis estadísticos y varía de acuerdo a las condiciones climáticas de cada región. Zacatecas por ser una zona árida y semiárida presenta altos valores de evaporación y se utiliza la siguiente expresión matemática Ec. (4),

Si la P_p es mayor de 5 mm, entonces la $P_e = P_p * 0.75$

si no $P_e = 0$

$$P_e = P_p * 0.75 \quad \text{Si } P_p > 5\text{mm} \quad (4)$$

$$P_e = 0 \quad \text{Si } P_p < 5\text{mm}$$

Riego

Es la cantidad de agua aplicada al cultivo de forma artificial expresada comúnmente como espesor o lámina de riego (cm). Para este concepto están definidos dos términos: La lamina de riego bruta (L_b): Es la cantidad de agua requerida por el cultivo para llevar acabo sus funciones fisiológicas (cm) y la lámina de riego neta (L_n): es el agua que se debe suministrar considerando la Eficiencia de aplicación (E_a) en (%), pérdidas de agua atribuibles a al grado de tecnificación (cm) y manejo de un sistema de riego (E_c). Tiempo de riego (T_r), el cual

depende del caudal o volumen de agua que provee el sistema de riego por unidad de tiempo. Un indicador importante es la Tasa Horaria (TH) que se refiere a la cantidad de agua en milímetros que sirve el sistema en una hora (mm/h), En el sistema de riego por goteo con cintilla, TH se estima con base al gasto del emisor (Q_e) en litros por hora (lph), normalmente 1lph; al espaciamiento entre emisores (E_e) de 0.20 a 0.30 m, y entre líneas regantes ó surcos (ELr), normalmente 0.76 m (Ec. 6). Para riego por multicompuerta se toma en cuenta el gasto de entrada a la sección de riego en litros por segundo (Ec. 7).

$$Ln = \frac{Lb}{Ea} \quad (5)$$

$$TH_{cinta} = \frac{1/ELr * Q_e}{E_e} \quad (6)$$

$$TH_{multi} = \frac{Q_{sec}(lps)}{3600} * Superficie \quad (7)$$

El Tr es la relación que hay entre la lámina neta de riego a aplicar entre la TH lo cual indica el número de horas que se regará.

$$Tr = \frac{Ln}{TH} \quad (8)$$

Escorrentía

La escorrentía supone una pérdida de agua desde la superficie del suelo hacia otros lugares y en ocasiones, puede suponer una ganancia de agua si ésta fluye hacia nuestro volumen de suelo o área radicular de cultivo desde zonas adyacentes.

Drenaje

El valor del drenaje por percolación profunda hacia el exterior desde nuestro volumen de suelo. Aunque normalmente es positivo, puede tomar signo negativo en el caso que hubiera ascenso capilar de agua desde un nivel freático somero debido a la escasa lluvia y teniendo un manejo adecuado del riego estos valores son irrelevantes.

Evapotranspiración

La evapotranspiración (ET) representa la suma de la lámina de agua que se evapora directamente desde la superficie del suelo y aquella que se transpira a través de la vegetación.

El agua de riego se consume tanto por la evaporación que ocurre desde la superficie del suelo como la que ocurre por transpiración desde la superficie de las hojas y que ha sido previamente absorbida por las raíces de la planta. Ante la dificultad de medir por separado la evaporación y la

transpiración, se utiliza el término evapotranspiración (ET) para referirse de manera conjunta a ambos tipos de flujo de agua (FAO, 1989).

La cantidad de agua consumida por un cultivo durante todo su ciclo se relaciona directamente con su rendimiento (Doorenbos y Kassam, 1996). El valor de ET depende de factores climatológicos como la temperatura, humedad del aire, radiación solar y velocidad del viento, tipo de suelo.

Determinación de la evapotranspiración

Los métodos para calcular la evapotranspiración pueden clasificarse en métodos directos e indirectos. Los primeros proporcionan directamente el consumo total del agua requerida, utilizando para ello aparatos e instrumentos como lisímetros, evapotranspirómetros y atmómetros.

Los métodos indirectos se basan en el uso de ecuaciones físico-empíricas para calcular la ET. El equipo requerido para medir directamente la ET regularmente no se encuentra disponible y debe estimarse a partir de datos climáticos y del cultivo. Tales métodos varían en su precisión dependiendo del enfoque de aproximación y del tipo y número de variables involucradas.

Ante la dificultad que implica la caracterización aerodinámica de la cubierta vegetal de cada cultivo, un

procedimiento común para estimar ET consiste en estimar primero la evapotranspiración de referencia (ET_r) y luego aplicar coeficientes adimensionales de cultivo (K_c) para estimar la ET (Doorenbos y Pruitt, 1977; Allen *et al.*, 1989).

$$ET = K_c * ET_r \quad (9)$$

$$K_c = \frac{ET}{ET_r} \quad (10)$$

Existen algunos modelos para estimar la evapotranspiración de referencia (ET_r) a partir de datos del cultivo como el índice de área foliar y datos climatológicos como la temperatura y humedad del aire, radiación solar y velocidad del viento. Todos tratan de representar, con diferente grado de aproximación, los principios físicos que gobiernan el flujo evapotranspirativo (Jensen *et al.*, 1990). El estado de Zacatecas cuenta con una Red de Estaciones climáticas administrada por el Campo Experimental de Zacatecas y la ET_r se calcula por medio de la ecuación de Penman –Monteith.

La ecuación de Penman-Monteith. Es uno de los métodos más completos y precisos para estimar ET_r es la ecuación de Penman-Monteith (Monteith, 1981), la cual resuelve el balance de energía y utiliza todas las variables del clima antes mencionadas:

$$\lambda ETr = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho c_p (e_a - e_d) r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)} \quad (11)$$

Donde λETr es la tasa evapotranspirativa expresada como flujo de calor latente ($\text{MJ m}^{-2} \text{t}^{-1}$), Δ la pendiente de la curva de presión de vapor a saturación ($\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$), R_n la radiación neta incidente sobre la cubierta vegetal ($\text{MJ m}^{-2} \text{t}^{-1}$), G el flujo de calor en el suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{t}^{-1}$), ρ la densidad del aire (kg m^{-3}), c_p el calor específico del aire ($\text{MJ kg}^{-1}\text{C}^{-1}$), e_a la presión de vapor a saturación del aire correspondiente a la temperatura del aire actual (kPa), e_d la presión de vapor a saturación correspondiente a la temperatura del punto de rocío (kPa), λ la constante psicrométrica ($\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$), r_a la resistencia aerodinámica a la difusión de calor y vapor de agua (t m^{-1}), y r_c la resistencia estomática al flujo de vapor de agua (t m^{-1}).

COEFICIENTE DEL CULTIVO

Es un coeficiente adimensional específico de cada cultivo que depende de su estado de desarrollo, por lo cual varía en el tiempo y expresa el grado de similitud entre la superficie vegetal del cultivo y la del cultivo de referencia. Sus valores se obtienen empíricamente a partir de datos experimentales (Doorenbos y Pruit, 1977; Annandale and Stockle, 1994).

El coeficiente de cultivo (K_c) describe las variaciones de la cantidad de agua que las plantas extraen del suelo a medida que van desarrollándose, desde la siembra hasta su madurez. Debido a las variaciones en las características del cultivo durante las diferentes etapas de crecimiento, K_c cambia a través del ciclo vegetativo. La siguiente figura representa de manera simplificada dichos cambios.

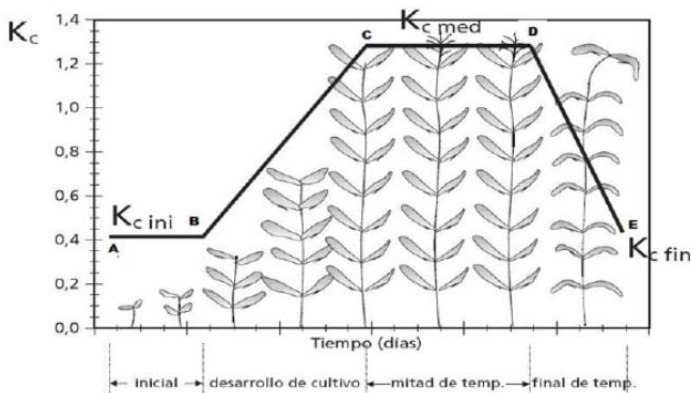


Figura 2. Curva generalizada del coeficiente de cultivo K_c .
Fuente: FAO (1977).

La Figura 2 muestra que se requieren seis valores para caracterizar la curva K_c de un cultivo. Tres valores de K_c : $K_{c\ ini}$, $K_{c\ med}$ y $K_{c\ fin}$, así como la duración en días o como fracción del ciclo vegetativo (D_{ini} , D_{med} y D_{fin}) total en los puntos B, C, y D. en el cuadro 1 se muestra los valores de K_c por etapas de los cultivos incluidos en el sistema en línea.

Cuadro 1. Coeficiente del Cultivo (Kc) para los cultivos de chile y frijol. FAO (1977)

Cultivo	Dini	Dmed	Dfin	Kcini	Kcmed	Kcfin
Chile	0.19	0.44	0.81	0.60	1.05	0.60
Frijol	0.18	0.45	0.82	0.40	1.10	0.55

HUMEDAD APROVECHABLE

A la cantidad de agua retenida en el suelo entre los valores de capacidad de campo (θ_{CC}) (entre -0.1 y -0.3 bars) y punto de marchitez permanente (θ_{PMP}) (-15 bars) se le conoce como humedad aprovechable (HA) (Allen *et al.*, 1998). Se refiere a la máxima cantidad de agua que puede retener el perfil del suelo ocupado por las raíces de las plantas (Pr). Regularmente se estima como una lámina o espesor de agua (Israelsen y Hansen, 1965, Withers y Vipond, 1982):

$$HA = (\theta_{CC} - \theta_{PMP})Pr \quad (12)$$

Donde θ_{CC} y θ_{PMP} se expresan en mm^3 de agua por mm^3 de suelo, HA y Pr en mm. El Cuadro 2 muestra valores promedio del contenido de humedad a saturación (θ_s), θ_{CC} , θ_{PMP} (Saxton *et al.*, 1986) y HA para cada tipo de textura y a 600 mm de profundidad del suelo ya que en Zacatecas la actividad chilera se desarrolla en suelos poco profundos y no hay suelos de más de 0.6 m de profundidad, como puede notarse, los suelos de textura fina tienen mayor HA que los de textura gruesa.

Cuadro 2. Constantes de humedad por tipo de suelo (Saxton *et al.*, 1986).

TEXTURA	θ_s	θ_{cc}	θ_{PMP}	HA (mm)
Arenosa	0.3545	0.1280	0.0567	42.78
Areno francosa	0.3878	0.1598	0.0764	50.04
Franco arenosa	0.4697	0.2522	0.1740	46.92
Franca	0.4617	0.2540	0.1180	81.60
Franco arcillo arenosa	0.4784	0.2676	0.1724	57.12
Franco arcillosa	0.5018	0.3215	0.1838	82.62
Franco arcillo limosa	0.5203	0.3648	0.1941	102.42
Franco limosa	0.4676	0.2857	0.1062	107.70
Arcillo arenosa	0.5052	0.3333	0.2419	54.84
Arcillo limosa	0.5422	0.4403	0.2786	97.02
Arcillosa	0.5566	0.5359	0.4127	73.92
Limosa	0.4154	0.3154	0.0962	131.52

Capacidad de campo

La capacidad de campo (θ_{cc}) de un suelo es usualmente descrita como el contenido de agua después que el drenaje de agua por flujo gravitacional es tan pequeño que llega a ser relativamente estable. Esta situación generalmente ocurre algunos días después que el suelo haya sido totalmente humedecido por lluvia o riego.

La capacidad de campo se determina simplemente vertiendo agua en la superficie del suelo y dejándola drenar por unos 4 a 10 días (dependiendo del tipo de suelo), previniendo

la evaporación de la superficie. Las muestras de suelo son luego recolectadas con barrena para su medición gravimétrica y el contenido de agua es expresado en bases volumétricas. Determinado de esta manera, el valor de capacidad de campo es reproducible si se tiene en cuenta no muestrear en zonas de transición. Debido a que la capacidad de campo es afectada por la estructura del suelo, las determinaciones de laboratorio no son siempre indicadores confiables del valor de campo.

Punto de marchitamiento permanente

El punto de marchitez permanente (θ_{PMP}) es el contenido de agua del suelo que ocurre cuando la planta se marchita y no recupera su turgencia por más que se riegue.

Briggs y Shantz (1912) enfatizaron primero la importancia de esta constante de humedad en el suelo, denominándola como coeficiente de marchitez. Ellos efectuaron mediciones en varios tipos de cultivos y encontraron que la mayoría se marchitaron en alrededor del mismo contenido de agua del suelo.

Richards y Wadleigh (1952) encontraron que la mayoría de las plantas cultivadas tienen potenciales osmóticos en el rango de -14 a -18 bares, de tal manera que para propósitos prácticos el contenido de agua en -15 bares es un valor generalmente usado como la mejor aproximación del contenido de agua en el suelo en el punto de marchitez permanente.

CRITERIO PARA CALENDARIZACIÓN DE RIEGO

Abatimiento de humedad aprovechable

La aplicación de un riego se realiza cuando el contenido de humedad del suelo disminuye hasta un valor crítico (θ_c) que determina el grado de estrés hídrico máximo al que se somete el cultivo. Por lo regular, este valor se estima en la escala de la humedad aprovechable, donde θ_{PMP} y θ_{CC} representan el cero y 100 por ciento de HA respectivamente (Figura 3). Se utiliza una fracción o porcentaje de abatimiento máximo de la humedad aprovechable FAM:

$$\theta_c = \theta_{CC} - \frac{FAM}{100} (\theta_{CC} - \theta_{PMP}) \quad (13)$$

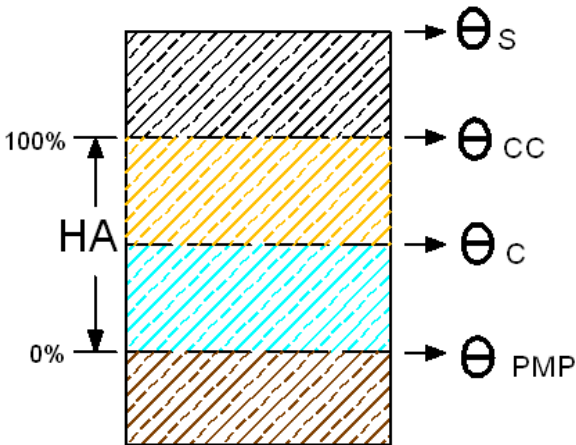


Figura 3. Representación gráfica de la humedad aprovechable del suelo.

Según la ecuación del balance de agua en el suelo Ec. (14), el contenido de agua del suelo en un día particular, θ_i , se estima con base en el contenido de agua del día previo, θ_{i-1} , y el resto de los términos de la Ec. (14) estimados para el día actual, a excepción de la escorrentía, no considerada aquí:

$$\theta_i = \theta_{i-1} + R_i + P e_i - E T_i - D_i \quad (14)$$

Luego se compara θ_i con θ_c para decidir si se aplica un riego o no. Si θ_i es menor que θ_c , entonces el cultivo debe regarse el día siguiente, si no, se actualizan cada uno de los términos de la Ec. (14) para el día siguiente y se compara nuevamente θ_i con θ_c . La cantidad de agua por aplicar R , comúnmente denominada como lámina de riego (L_r), puede calcularse como el producto de H_a y FAM , o bien como:

$$L_r = (\theta_{cc} - \theta_c) Pr \quad (15)$$

Para definir el tiempo y la lámina de riego neta (L_n) que se va a aplicar con el sistema de riego y que no es precisamente la que llega al suelo L_r se divide entre la eficiencia de aplicación (E_a) Por ejemplo para el estado de Zacatecas la operación de los riegos con cintilla fluctúa entre 85-90%.

$$Ln = \frac{Lr}{Ea/100} \quad (16)$$

Días de la semana

Este criterio se utiliza comúnmente en riego por cintilla porque presenta altas frecuencias y es la suma de la demanda diaria θ_i Ec. (14) partiendo del día de riego anterior hasta el siguiente día que se va a regar que va desde un día hasta 7 días. Por ejemplo si se regara lunes y jueves, el riego del jueves sería la demanda del día lunes, martes y miércoles y el riego del lunes sería la demanda de los días viernes, sábado y domingo ya sea que se exprese en lámina o tiempo de riego (Ec. 8 y 14).

LA RED DE MONITOREO AGROCLIMÁTICO

El clima es uno de los componentes ambientales más determinantes en la adaptación, distribución y productividad de los seres vivos, es por esto que la información del estado del tiempo es parte fundamental para la toma de decisiones en la agricultura moderna que requiere información meteorológica actualizada para sus procesos de producción.

La cantidad de agua de lluvia, la humedad almacenada en el suelo, la ocurrencia de heladas, o la presencia de granizo,

constituyen algunos de las variables del clima que año con año repercuten en la producción de cosechas.

Con el propósito de tener un conocimiento de las condiciones del clima en relación con el desarrollo de los cultivos y su manejo, en el año 2002 se implementó el proyecto “Red de monitoreo agroclimático del estado de Zacatecas”, gracias al esfuerzo conjunto del INIFAP, Gobierno del Estado y Gobierno Federal a través de la Fundación Produce Zacatecas, A. C.

La red cuenta con 36 estaciones climáticas automáticas distribuidas como se muestra en la Figura 5. Cada una cuenta con sensores para medir la temperatura del aire, humedad relativa, precipitación, dirección y velocidad del viento, radiación solar y humedad de la hoja. La medición de las condiciones del estado del tiempo se realiza cada 15 minutos y los datos son transmitidos a la base central en el Campo Experimental Zacatecas (Medina *et al.*, 2007).

La “Red de monitoreo agroclimático” es una herramienta de apoyo en la toma de decisiones de las dependencias estatales y federales involucradas en el desarrollo agropecuario del Estado, así como para los agricultores y ganaderos.

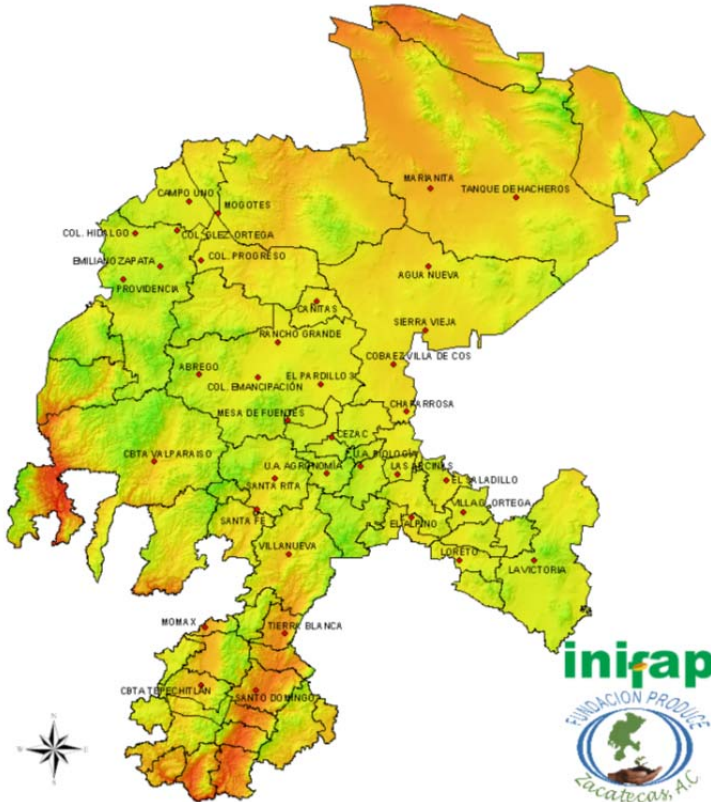


Figura 4. Rede de monitoreo agroclimático del estado de Zacatecas.

Algunas de las aplicaciones que puede darse a esta información climática registrada por las estaciones se encuentran: Cálculo de necesidades de riego, pronóstico de aparición y monitoreo del desarrollo de plagas y enfermedades, monitoreo de acumulación de unidades calor y unidades frío, medición del número e intensidad de heladas, diseño de protocolos de manejo climático de invernaderos, pronósticos de cosechas, cálculo de índices de humedad y sequía en cultivos

de temporal, determinación de índices de confort climático para el ganado, etc.

EL SISTEMA PARA LA PROGRAMACIÓN DE RIEGOS

Datos de entrada

Como en cualquier aplicación basada en entradas procesos y salidas la parte fundamental son los datos. Esta aplicación clasifica los datos de entrada en 3 tipos, ubicándose primero la estación agrometeorológica más cercana al sitio o predio.

Datos generales y de cultivo

Estación: En este apartado se selecciona la estación más cercana de las 36 estaciones que se encuentran distribuidas en el Estado con la finalidad de ligar la consulta de evapotranspiración de referencia (ET_r) y precipitación (P_p).

Nombre de la parcela: Este es definido por el usuario con el fin de identificar la parcela porque cada usuario cuenta con una base de datos donde se guardan los datos de cultivo, suelo y sistema de riego. Se pueden tener tantas parcelas como se necesite y tenga establecidas en campo por ejemplo “Los Pardillos Tabla 04 Chile 14/Abril/2012”

Cultivo: Ente apartado el usuario seleccionara el cultivo que quiera establecer con el fin de consultar la base de datos de los coeficientes del cultivo (kc) para realizar los cálculos de la evapotranspiración del cultivo, chile y frijol para esta versión del programa.

Fecha de siembra o trasplante: En este campo se selecciona la fecha de siembra en caso de frijol y trasplante en caso de chile, con la finalidad de que el sistema identifique la inicial para la consulta de datos climáticos y el cálculo del balance de agua en el suelo hasta el último riego o hasta la cosecha (se solicita en día y mes).

Ciclo del cultivo: Es el tiempo que dura el cultivo en la parcela e inicia en la siembra o trasplante y termina en el último riego o la cosecha y se expresa en días. Para frijol el ciclo es de 100-120 días y para chile son 140-160 días. Estos datos pueden variar con la variedad y las condiciones climáticas.

Datos de suelo y criterio de riego

Textura: Es la relación del porcentaje de arena limo y arcilla y se clasifica en 12 categorías (cuadro 2) se selecciona la textura existente en el predio y esta aplicación consulta los datos de CC y PMP para determinar la cantidad de agua que soporta un suelo a cierta profundidad para evitar déficit o percolaciones. En esta sección el, usuario puede definir los datos de CC y PMP propios de cada parcela para tener mayor certeza de los

cálculos, estas determinaciones del suelo se pueden realizar en el Laboratorio de análisis de suelos del CEZAC.

Profundidad radicular: Es la profundidad del suelo agrícola o la profundidad de exploración de las raíces expresada en centímetros (cm), en Zacatecas los suelos son muy poco desarrollados y presentan profundidades no mayores de 60 cm. Este dato se puede determinar realizando un pozo hasta que le sea imposible continuar excavando en la parcela que se desea regar y medir desde la superficie del suelo hasta al fondo del pozo.

Criterio de riego: esto se hace con el fin de definir la fecha de riego, considerando uno de los dos criterios que a continuación se describen.

Abatimiento: Se refiere a la fracción de la humedad aprovechable del suelo que se permite consumir al cultivo entre un riego y otro (Ec 13). Se expresa como porcentaje en el rango de 0 (CC) a 100% (PMP). Valores bajos de abatimiento producen riegos frecuentes con intervalos entre riegos amplios y viceversa. Con este criterio el usuario consultará en los reportes las fechas de riego resultantes y las láminas o tiempos de riego correspondientes.

Por días: Si el usuario selecciona este criterio él tendrá que definir qué días por semana quiere regar y activar la casilla para que la aplicación realice los cálculos pertinentes y haga el

balance. En este caso el usuario consultará el sistema en líneas las láminas y tiempos de riego correspondientes a los días de la semana seleccionados para regar.

Datos del sistema de riego

En esta sección se seleccionará el tipo de sistema de riego que utilice en su predio, la aplicación considera multicompuertas o riego por gravedad y cintilla o riego presurizado que están dentro de los más comunes en el Estado. Al seleccionar el tipo de riego a utilizar se deben llenar los siguientes datos para el cálculo de la tasa horaria:

Multicompuertas.

Gasto del sistema: Se refiere al gasto en litros por segundo que entra a la parcela que se va a regar.

Cintilla.

Gasto del emisor: Este dato es el gasto en litros por hora del emisor según las especificaciones del fabricante (0.54, 0.80, 1.06 LPH), o bien para tener mejor certeza se puede realizar un aforo, la relación de volumen sobre tiempo para obtener el gasto del emisor o gotero.

Espaciamiento entre emisores: Este dato se refiere al espacio en metros que hay de gotero a gotero, siendo los de 0.2 y 0.3 m los más utilizados.

Espaciamiento entre líneas regantes: Se refiere al a la separación entre cintilla y cintilla que está muy relacionada con el espaciamiento entre surcos (0.76, 0.8 m.).

Tasa horaria: Este cálculo resulta de los datos proporcionados por tipo de riego (Ec. 6 y 7). Si el sistema de riego es distinto a los especificados en esta aplicación, el usuario puede calcular por separado la tasa horaria de su sistema de riego e ingresarla a la aplicación para calcular los tiempos de riego.

Eficiencia de aplicación: Es la relación entre el agua aplicada por el sistema y el agua almacenada en la zona de raíces. Para un sistema de riego de 65 % de eficiencia, indica que de cada 100 litros aplicados por el sistema, 65 litros llegan a las raíces y son aprovechados por las plantas y los otros 45 litros se pierden, ya sea por evaporación o percolación profunda. Se considera que el riego por multicompuertas opera con una eficiencia de 45-65% y con 85-95% el riego con cintilla.

Superficie de riego: en este apartado se agrega la superficie en hectáreas de la parcela que se va regar.

Descripción de la aplicación

El lenguaje de programación que se utilizó para el desarrollo del sistema en plataforma WEB fue PHP (*Hypertext Pre-processor*) que, junto con HTML, permite crear sitios WEB dinámicos, que pueden utilizarse en cualquier computadora de escritorio o portátil conectada a internet. Este sistema permite obtener de manera integral el calendario de riego que consta de fecha de riego, lamina de riego y tiempo de aplicación de la lámina de riego para cubrir los requerimientos hídricos del cultivo.

La metodología se basa en el balance hídrico del perfil del suelo considerando parámetros climáticos, aportaciones de agua de riego y lluvia como principales entradas, y demanda evapotranspirativa del cultivo como su principal salida (Jensen and Robb, 1970). La parte fundamental del balance es la determinación de la evapotranspiración (mm) y los datos de entrada de precipitación, los cuales son obtenidos en la red de 36 estaciones agroclimáticas administrada por el INIFAP en Zacatecas. Esta base de datos es consultada por el programa en tiempo real para realizar dicho balance.

Para acceder al sistema para la programación de riegos es necesario ingresar al sitio de internet <http://www.zacatecas.inifap.gob.mx>, con lo cual aparecerá la pantalla mostrada en la Figura 5. Una vez ahí, deberá ir al

menú “Monitoreo agroclimático” o hacer clic en la imagen de la estación de clima. En la siguiente pantalla seleccionar el menú “Riego” y seleccionar la opción “Sistema de riego” con lo que aparecerá la pantalla para ingresar al sistema (Figura 6).

inifap
 Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias
 Inicio Inifap Cizac Publicaciones Monitoreo agroclimático Potencial productivo Intranet

El INIFAP es una Institución de excelencia científica y tecnológica con liderazgo y reconocimiento nacional e internacional por su capacidad de respuesta a las demandas de conocimiento e innovaciones tecnológicas en beneficio del sector forestal, agrícola y pecuario de la sociedad en general.

El INIFAP en **Zacatecas** genera, valida y apoya la transferencia de tecnologías acorde a las necesidades de productores agropecuarios y forestales del Estado, que contribuyan a mejorar sus condiciones de vida y a conservar los recursos naturales.

RED DE MONITOREO AGROCLIMÁTICO DEL ESTADO DE ZACATECAS

Cuenta con 36 estaciones meteorológicas automáticas, cada una está equipada con sensores para medir la temperatura, humedad relativa, precipitación, dirección y velocidad del viento, radiación solar y humedad de la hoja. Las mediciones de las condiciones del estado del tiempo se realiza cada 15 minutos.

¿Se le anda quemando el bosque?

En INIFAP hemos desarrollado tecnologías para la prevención y detección de incendios forestales en el país


CAMPO EXPERIMENTAL ZACATECAS
 Kilómetro 24.5 Carretera Zacatecas-Fresnillo
 Apartado Postal No. 18
 Calera de V.R., Zac., 98500


Tel (478) 9-85-01-98 Y 9-85-01-99
 Fax (478) 9-85-03-63
 Correo electrónico: direccion@zacatecas.inifap.gob.mx
 Pagina WEB: <http://www.zacatecas.inifap.gob.mx>

Figura 5. Pantalla de inicio del sitio de internet del Campo Experimental Zacatecas.



Figura 6. Pantalla de inicio

Para utilizar esta aplicación es necesario registrarse de manera gratuita haciendo clic en , para tener un nombre de usuario y contraseña(Figura 6).

Una vez registrado su nombre de usuario y contraseña hacer clic en el botón  que se encuentra en la parte inferior de la pantalla de ingreso al sistema (Figura 6).

Al entrar al sistema se muestra el mapa de la red de estaciones agroclimáticas (Figura 7), donde el usuario seleccionará la estación más cercana a su predio.

Sistema para programar y calendarizar el riego de los cultivos en Tiempo Real
SIPRO-RIEGO

Bienvenido



Miguel Servin Palestina

ESTACIONES

CULTIVO

PARCELAS

Mapa de Distribución de Estaciones

Seleccione la estación

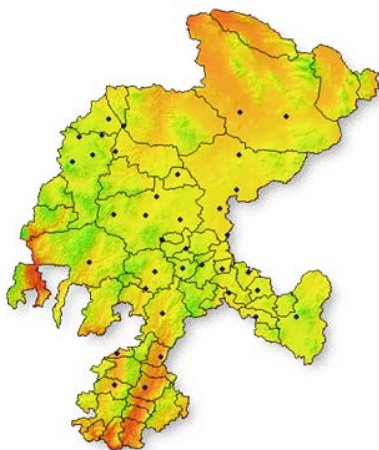


Figura 7. Selección de la estación agroclimática para consulta de datos.

A continuación se solicitarán los datos de entrada divididos en tres secciones 1) Datos generales y de cultivo 2) Datos de suelo y criterio de riego y 3) Datos sobre el sistema de riego (Figura 8). Para facilitar el uso del programa se incluyen textos de ayuda que describen conceptos y variables de entrada y salida.

ESTACIONES
CULTIVO
PARCELAS

Datos generales de cultivo

Estación ?
 Nombre de parcela ?
 Cultivo ?
 Fecha de siembra o trasplante DIA MES
 Ciclo de cultivo DIAS ?

Datos de suelo y manejo de abatimiento

Textura ?
 CC PMP
 Profundidad radicular cm ?
 Abatimiento ?
 Criterio de calendarización de riego ?
 Por Dias

Datos sobre el sistema de riego

Multicompuerta ?
 Gasto del Sistema ips
 Cintilla ?
 Gasto del Emisor lph
 Espaciamiento entre emisores m
 Espaciamiento entre líneas regantes m

Tasa horaria mm/hr ?
 Eficiencia de aplicación % ?
 Superficie de riego ha ?

Figura 8. Datos de entrada

Una vez proporcionados todos los datos se da clic en el botón Guardar para agregar los datos en su base de datos personal validados por un mensaje de registro exitoso (Figura 9).

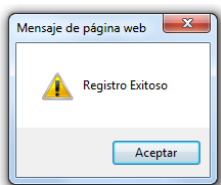



Figura 9. Mensaje de registro

Se da clic en  y se muestra la base de datos de la parcela agregada (Figura 10).

**Sistema para programar y calendarizar el riego de los cultivos en Tiempo Real
SIPRO-RIEGO**

Bienvenido  Miguel Servin Palestina 


ESTACIONES **CULTIVO** **PARCELAS**


Cultivos Guardados

Nombre parcela	Cultivo	Estacion consultada	Fecha Siembra	Tipo Riego	Calcular
prueba 02	Chile	Fresnillo, El Pardillo 3	06-03-2012	Cintilla	  
chile 2	Chile	Calera, CEZAC	10-03-2012	Cintilla	  
la colorada tabla 2	Chile	Fresnillo, El Pardillo 3	15-04-2012	Multicompuertas	  
ejemplo	Chile	Pinos, La Victoria	21-04-2012	Cintilla	  
Ejemplo	Chile	Trancoso, Las Arcinas	13-04-2012	Cintilla	  

 Agregar Cultivo

Figura 10. Parcelas del usuario agregadas.

Con un clic en  se mostrará la pantalla correspondiente al reporte de riego donde se presenta en forma de tabla la fecha de riego, la lámina neta a aplicar y el tiempo de riego (Figura 11) y de manera gráfica el comportamiento de la humedad en el suelo (Figura 12).

En la pantalla de la Figura 10 podrá eliminar los registros de la parcelas dando clic en **X**. También podrá agregar tantas parcelas como sean necesarias con un clic en  se mostrará la pantalla de la Figura 8 para agregar otra parcela.

Reporte de Riego

Ir Reporte Completo 

Fecha	Lámina Neta (mm)	Tiempo
2012-04-13	85.89	13 h 04 m
2012-04-16	15.85	2 h 25 m
2012-04-20	16.60	2 h 31 m
2012-04-23	13.81	2 h 06 m
2012-04-27	17.19	2 h 37 m
2012-04-30	13.47	2 h 03 m
2012-05-03	15.09	2 h 17 m
2012-05-07	14.60	2 h 13 m
2012-05-10	17.15	2 h 37 m
2012-05-13	15.40	2 h 20 m
2012-05-16	17.69	2 h 41 m
2012-05-18	15.19	2 h 19 m
2012-05-20	13.15	2 h 00 m
2012-05-23	15.10	2 h 10 m

Figura 11. Reporte de riego

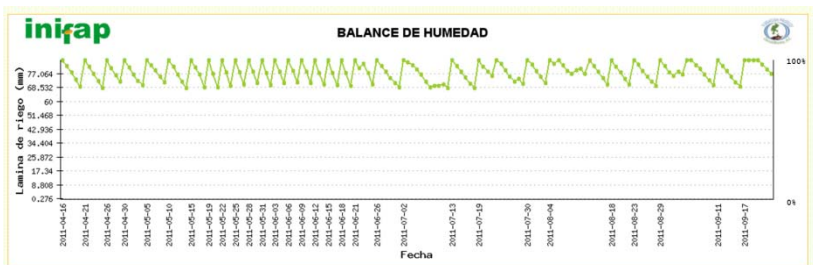




Figura 12. Gráfico de balance de humedad en el suelo.

En la pantalla mostrada en la Figura 8 también se puede editar la información contenida en cualquiera de los archivos de la base de datos personal previamente capturados dando clic en  , con esto mostrará la pantalla de edición.

Reportes e interoperación de resultados

El reporte principal de esta aplicación es mostrado en las Figuras 10 y 11 iniciando con la fechas de siembra o trasplantes y empezando una cuenta regresiva de los días que proporcionó en el ciclo del cultivo (Figura 8).

Dentro de la pantalla mostrada en la Figura 11 podrá consultar el reporte completo del balance diario de agua de riego en el suelo dando clic en  desplegando la siguiente pantalla (Figura 13).

En la primera columna se muestran las fechas para cada día del ciclo del cultivo a partir de la fecha de siembra o trasplante. Las dos siguientes columnas indican los valores de precipitación y evapotranspiración del cultivo de referencia (Ec. 11) consultados de las estaciones agrometeorológicas.

La cuarta y quinta columnas muestran la precipitación efectiva (Ec. 4) y evapotranspiración del cultivo (Ec. 9), respectivamente.

Reporte de Riego

Ir Reporte Resumen

Fecha	Pre	Eto	Pe	Etr	Balance	Riego	Lámina Riego (mm)	Lámina Neta (mm)	Tiempo
2012-04-13	0	7.91	0.00	4.75	81.60	Riego	81.60	85.89	13 h 04 m
2012-04-14	0	8.72	0.00	5.23	76.85	No Riego	0.00	0.00	0 h 00 m
2012-04-15	0	8.47	0.00	5.08	71.62	No Riego	0.00	0.00	0 h 00 m
2012-04-16	0	7.61	0.00	4.57	66.54	Riego	15.06	15.85	2 h 25 m
2012-04-17	1.2	5.49	0.00	3.29	77.03	No Riego	0.00	0.00	0 h 00 m
2012-04-18	0	5.73	0.00	3.44	73.74	No Riego	0.00	0.00	0 h 00 m
2012-04-19	0	7.45	0.00	4.47	70.30	No Riego	0.00	0.00	0 h 00 m
2012-04-20	0	8.18	0.00	4.91	65.83	Riego	15.77	16.60	2 h 31 m
2012-04-21	0	6.96	0.00	4.18	76.69	No Riego	0.00	0.00	0 h 00 m
2012-04-22	0	6.72	0.00	4.03	72.52	No Riego	0.00	0.00	0 h 00 m
2012-04-23	0	6.54	0.00	3.92	68.48	Riego	13.12	13.81	2 h 06 m
2012-04-24	0	6.82	0.00	4.09	77.68	No Riego	0.00	0.00	0 h 00 m
2012-04-25	0	6.90	0.00	4.14	73.58	No Riego	0.00	0.00	0 h 00 m
2012-04-26	0	6.95	0.00	4.17	69.44	No Riego	0.00	0.00	0 h 00 m
2012-04-27	0	5.81	0.00	3.49	65.27	Riego	16.33	17.19	2 h 37 m
2012-04-28	0	7.32	0.00	4.39	78.11	No Riego	0.00	0.00	0 h 00 m
2012-04-29	0	8.18	0.00	4.91	73.73	No Riego	0.00	0.00	0 h 00 m

Figura 13. Reporte completo del balance de agua en el suelo.

La sexta columna del reporte de riego indica el contenido de humedad aprovechable del suelo como resultado del balance diario de agua en el mismo (Ec. 14). La séptima columna indica la necesidad de aplicación o no de riego para cada fecha. Se requerirá riego cuando la humedad aprovechable del suelo disminuya hasta el nivel de abatimiento crítico establecido (Ec. 13), o bien, cuando el día coincida con los días de la semana predefinidos como días de riego.

La octava columna del reporte de riego muestra la lámina de riego neta requerida por las plantas para realizar sus funciones fisiológicas, mientras que la novena columna señala la lámina bruta, es decir, la lámina neta afectada por la eficiencia de aplicación del sistema de riego. Las dos últimas

columnas presentan el tiempo en horas y minutos respectivamente que se debe regar la parcela de acuerdo a la tasa horaria del sistema de riego.

La presente aplicación computacional es una herramienta útil y precisa para que los productores de chile y frijol bajo riego del estado de Zacatecas, calculen las demandas de agua de sus cultivos y programen sus riegos en línea y tiempo real. No obstante, el uso de esta herramienta es responsabilidad del usuario.

LITERATURA CITADA

- Allen R.G., Jensen, M.E., Wright, J.L., and R.D. Burman. 1989. Operational estimates of reference evapotranspiration. *Agron. J.* 81:650-662.
- Allen R.G., L.S. Pereira, D. Raes, M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage. Paper 56.
- Annandale, J.G., and C.O. Stockle. 1994. Fluctuation of crop evapotranspiration coefficients with weather: a sensitivity analysis. *Irrig. Sci.* 15:1-7.
- Briggs L.J. and H.L. Shantz. 1912. The wilting coefficient for different plants and its indirect determination. USDA Bureau of Plant Industry Bull 230. U.S. Gov. Printing Office, Washington, D.C.
- Buchner, R. P., Goldhamer, D. A. and Shaw, D. A. 1994. Irrigation scheduling in kiwifruit growing and handling, In: Hasey J. K.; Johnson, R. S.; Grant, J. A. and Reil, W. O. (eds.). University of California Publication 3344. p. 43–49.

- Castro, O. 2005. El balance hídrico, herramienta para la planificación del riego en caña de azúcar. En: Memoria de presentación de resultados de investigación zafra 2004-2005. Guatemala. CENGICAÑA. 185p.
- Catalán V., E.A.; Sánchez C., I.; Villa C., M.M.; Inzunza I., M.A. y Mendoza M., S.F. 2007. Programa para calcular demandas de agua calendarizar el riego de los cultivos. Folleto técnico 7. INIFAP CENID RASPA. Gómez Palacio, Durango.
- Doorenbos J. and Kassam A., H. 1996. Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33. Rome, Italy.
- Doorenbos J. and W.O. Pruitt. 1977. Crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper 24. Food and Agriculture Organization. United Nations, Rome, Italy.
- Food and Agriculture Organization (FAO). 1977. Crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 24. Rome, Italy.
- Food and Agriculture Organization (FAO). 1989. Irrigation water management: Irrigation scheduling. Training Manual No. 4. Rome Italy.
- Giuliani, R.; Magnanini, A. and Flore, J. A. 2001. Potential use of infrared thermometry for the detection of water deficit in apple and peach orchards. Acta Hort. 557:38–43.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) 1995. Coordinación de tecnología de riego y Drenaje, Proyecto RD-95062 “Diagnóstico de la salinidad en el Distrito de Riego 076, Valle del Carrizo, Sinaloa”.
- Israelsen O., W., y V.E. Hansen. 1965. Principios y aplicaciones del riego. Seg. Ed. Editorial Reverte, Barcelona, España. 385pp.

- Jensen M. E., Burman R., D. and R.G. Allen. 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. American Society of Civil Engineers. Irrigation Water Requirements Committee of the Irrigation and Drainage Division. Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70. New York. 332 p.
- Jensen M.E., D.C.N. Robb. 1970. Scheduling irrigations using climatecrop- soil data. Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, 96(IR1): p 25-38.
- Maldonado I. 2000. Revista Tierra Adentro. Septiembre-Octubre. pp 28-29.
- Medina G., G.; Báez G., A. D. y Ramos G., J. L. 2007. Red de monitoreo agroclimático del estado de Zacatecas. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro de Investigación Regional Norte Centro, Campo Experimental Zacatecas, México. (Desplegable informativa No. 15).
- Mojarro D. F., Echavarría C. F., Júnez F. H. E., Barrio D. J. N., Bautista C.C .F., Vélez R. A. 2011 Políticas de manejo de acuíferos en México: Caso Zacatecas. El sudcaliforniano La Paz B. C. S Abril del 2011 <http://pcti.mx>.
- Mojarro D., F. 2004. Manual práctico de riego y fertiriego para el estado de Zacatecas. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo rural, Pesca y Alimentación, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Zacatecas. Calera de V. R., México.
- Monteith, J.L. 1981. Evaporation and surfacetemperature. Quart. J.R. Meteorol. Soc. 107:1-27.
- Ortega F.S. y C. Acevedo. 1999. "Programación del riego usando sistemas meteorológicos automáticos" en Curso: Riego por Aspersión y Goteo. Universidad de Talca. Talca.

- Palacios, V. E. y A. Martínez, G. 1978. Respuesta de los cultivos a diferentes niveles de humedad del suelo. Colegio de Posgraduados. Chapingo, Estado de México,. México p 1-10.
- Richards, L.A. and C.H. Wadleigh. 1952. Soil physical conditions and plant growth. Ed. Am. Soc. Agron. Monograph.
- Sánchez C., I. 2005. Fundamentos para el aprovechamiento integral del agua. Un enfoque de simulación de procesos. Libro científico No. 2. INIFAP CENID RASPA. 272 pp. Gómez Palacio, Dgo. México.
- Sánchez C., I.; Catalán V., E.A.; and Villa C., M.M. 2006. Evapotranspiration modeling for irrigation purposes. Chapter book. In. Modeling and Remote Sensing Applied to Agriculture. pp. 71 – 89. USA – Mexico. USDA ARS – INIFAP.
- Sánchez C., I.; Estrada A., J. and González C., G. 2002. Irrigation Technology in the Irrigation Districts of México. International Water Resources Association. Water International 27: 578 - 584. U.S.A.
- Saxton K., E.; Rawls W., J.; Romberger J., S. and R. I. Papendick. 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. Soil Sci. Soc. Am. J. 50: 1031-1036.
- Torres, J; Cruz R.; Villegas, F. 1996. Avances técnicos para la programación y manejo del riego en caña de azúcar. Colombia. CENICAÑA. 53p.
- Withers B., and Vipond S., 1982. El riego, diseño y práctica. Tercera reimpresión. Ed. Diana. México, D.F. 350pp.

AGRADECIMIENTOS

A la Fundación Produce Zacatecas A.C.
Por el apoyo financiero al proyecto

“MANEJO Y PLANEACIÓN AGRÍCOLA MEDIANTE LOS
SISTEMAS DE INFORMACIÓN CLIMÁTICA”

Del cual se desprende esta publicación

SISTEMA EN LÍNEA PARA PROGRAMACIÓN DE RIEGO DE CHILE Y FRIJOL EN ZACATECAS

REVISIÓN TÉCNICA

Dr. Miguel A. Velázquez Valle
Dr. Luis Roberto Reveles Torres

DISEÑO DE PORTADA

Ing. Miguel Servín Palestina

GRUPO COLEGIADO DEL CEZAC

Presidente: Dr. Jaime Mena Covarrubias
Secretario: Dr. Francisco G. Echavarría Cháirez
Comisión Editorial y Vocal: Dr. Alfonso Serna Pérez
Vocal. Dr. Guillermo Medina García
Vocal: Ing. Manuel Reveles Hernández
Vocal: Dr. Luis Reveles Torres
Vocal: Dr. Jorge A. Zegbe Domínguez

La presente publicación se terminó de imprimir en el mes de
Noviembre de 2012 en la Imprenta Mejía, Calle Luis Moya No. 622
C.P. 98500, Calera de V.R., Zac. México
Tel. (478) 98 5 22 13

Su tiraje constó de: 500 ejemplares

DIRECTORIO

CAMPO EXPERIMENTAL ZACATECAS

Dr. Francisco G. Echavarría Cháirez

Director de Coord. y Vinculación

PERSONAL INVESTIGADOR

Ing. Ricardo A. Sánchez Gutiérrez	Bioenergéticos
M.C. Manuel de Jesús Flores Nájera	Caprinos y Ovinos
M.C. Juan Carlos López García	Caprinos y Ovinos
I.T.A. Juan José Figueroa González	Frijol
Ing. José Ángel Cid Ríos	Frijol
M.C. Valentín Melero Meraz	Frutales Caducifolios
Ing. Ma. Guadalupe Zacatenco González	Frutales Caducifolios
Dr. Jorge A. Zegbe Domínguez	Frutales Caducifolios
Ing. Manuel Reveles Hernández	Hortalizas
M.C. Enrique Medina Martínez	Maíz y Frijol
Dr. Guillermo Medina García	Agroclimatología y modelaje
M.C. Nadiezhda Y.Z. Ramírez Cabral	Agroclimatología y modelaje
Dr. Ramón Gutiérrez Luna	Pastizales y Forrajes
M.C. Francisco Rubio Aguirre	Pastizales y Forrajes
Dr. Luis Roberto Reveles Torres	Recursos genéticos
Dr. Jaime Mena Covarrubias	Sanidad Vegetal
Dr. Rodolfo Velásquez Valle	Sanidad Vegetal
M.C. Blanca I. Sánchez Toledano	Socioeconomía
Dr. Alfonso Serna Pérez	Suelo y Agua
Ing. Miguel Servín Palestina	Suelo y Agua
Dra. Raquel Karina Cruz Bravo	Valor agregado

www.gobiernofederal.gob.mx
www.sagarpa.gob.mx
www.inifap.gob.mx



GOBIERNO DEL ESTADO
2010-2016



ZACATECAS
CONTIGO EN MOVIMIENTO

inifap

Instituto Nacional de Investigaciones
Forestales, Agrícolas y Pecuarias