



## III CONGRESO NACIONAL DE RIEGO Y DRENAJE COMEII 2017

Puebla, Pue., del 28 al 30 de noviembre de 2017

### PARAMETRIZACIÓN DE UN MODELO INTEGRAL PARA EL PRONÓSTICO DEL RIEGO EN MAÍZ (*Zea mays* L.) CULTIVADO EN EL DISTRITO DE RIEGO 052 “DURANGO”

Marco Antonio Nieves-Martínez<sup>1</sup>; Hilario Flores-Gallardo<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Instituto Tecnológico del Valle del Guadiana (ITVG). Carretera Durango - México km 22.5, Villa Montemorelos, C.P. 34371, Durango, México.

<sup>2</sup>Campo Experimental Valle del Guadiana. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Carretera Durango - El Mezquital km 4.5, C.P. 34170, Durango, México.

[flores.hilario@inifap.gob.mx](mailto:flores.hilario@inifap.gob.mx) - (55) 3871 8700 ext. 82712 (\*Autor de correspondencia)

#### Resumen

En México, la disponibilidad de agua en zonas áridas y semiáridas es altamente crítica. Las grandes superficies agrícolas bajo riego se ubican en dichas zonas y debido a la necesidad del sector agrícola por grandes volúmenes de agua para satisfacer los requerimientos hídricos de los cultivos, independientemente del sistema de riego utilizado, se requieren tecnologías mediante modelos de fácil implantación en los sistemas computacionales para apoyar en la toma de decisiones a los productores y técnicos agrícolas, con el propósito de coadyuvar en la aplicación y distribución del agua de riego a nivel parcelario. El objetivo del trabajo fue parametrizar un modelo integral para el pronóstico del riego en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.), mediante su previa calibración y validación durante dos ciclos agrícolas primavera-verano (PV) 2015 y 2016, el modelo está basado en el concepto grados día (°D) e involucra la relación agua-suelo-planta-atmósfera (RASPA) para generar calendarios de riego con láminas de riego ( $L_r$ ) requeridas y recomendadas para el sistema de riego por gravedad en dos sitios experimentales del INIFAP, ubicados en los municipios de Canatlán y Durango, los cuales son representativos para el área de influencia del Distrito de Riego 052 “Durango”. El modelo se ajusta automáticamente a la variabilidad climática de la región con el propósito de actualizar sus cálculos que son resultado de su alimentación con las variables climáticas (temperatura media, precipitación y evapotranspiración de referencia), las cuales se obtuvieron de la Red Nacional de Estaciones Agrometeorológicas Automatizadas (RENEAA) que opera el INIFAP.

**Palabras clave adicionales:** coeficiente de cultivo ( $K_c$ ), grados día (°D), variabilidad climática.



## Introducción

En México se registra una superficie agrícola de 22 millones de hectáreas (ha), dentro de las cuales se dividen con el 29.5 % de la superficie para la agricultura de riego y el 70.5 % restante para la agricultura de temporal (CONAGUA, 2012; SIAP, 2013). De acuerdo con las estadísticas de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2016), para el caso de la superficie establecida bajo riego a nivel nacional, ésta oscila en 6.5 millones de hectáreas, distribuidas en 86 Distritos de Riego (DR) y 40 407 Unidades de Riego (UR). Sin embargo, las eficiencias en el uso del agua de riego, específicamente en la eficiencia de aplicación se encuentran por debajo del 40 % en la mayoría de los distritos y módulos de riego del país, repercutiendo en grandes pérdidas en los volúmenes de agua que se utilizan a través del riego. Del total de la superficie registrada para producir bajo la modalidad de riego, se presentan 1.3 millones de ha tecnificadas con sistemas de riego por multi-compuertas, aspersión y goteo; contrastando las 5.2 millones de ha restantes donde el agua se aplica mediante el sistema de riego por gravedad (superficial), por lo cual es necesario e importante un manejo adecuado del riego a nivel parcelario mediante un seguimiento constante que permita realizar evaluaciones sobre la eficiencia y distribución del agua para mejorar su aplicación (Flores-Gallardo *et al.*, 2012).

En las zonas áridas y semiáridas de México, se produce la mayor cantidad de alimentos y se obtienen los mejores rendimientos a nivel nacional, donde se encuentra la mayor superficie bajo riego y donde la intensificación de la variabilidad climática ha generado incertidumbre en los volúmenes de agua disponible, ocasionando inestabilidad en la productividad de varios cultivos (Flores-Gallardo *et al.*, 2013). Por lo tanto, es considerado que la aplicación del agua de riego es indispensable para asegurar rendimientos comerciales aún en zonas con alta precipitación (Wanjura y Upchurch, 2000). Desafortunadamente, gran parte de la aplicación del riego se realiza de acuerdo al criterio que el agricultor o regador ha adquirido como experiencia y al manejo que ofrece cada parcela, ya que la programación científica del riego en la mayoría de los casos se realiza aplicando los procedimientos propuestos por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (Food and Agriculture Organization [FAO], por sus siglas en inglés) (Allen *et al.*, 2006) debido a que existe nula o escaso material bibliográfico generado localmente (Sifuentes y Ojeda, 2005). La desventaja de dichos procedimientos es que fueron generados en otras regiones del mundo, por lo cual resultan empíricos para realizar procesos minuciosos y generar los pronósticos con base a días calendario requiriendo de ajustes manuales por el usuario (Doorenbos y Kassam, 1979). Debido a que la competencia por la disponibilidad de agua es cada vez más fuerte o intensa, existe la necesidad de generar un reconocimiento económico, social y ambiental al buen uso del agua (Flores-Gallardo *et al.*, 2014). Por tal motivo, para que una calendarización y la supervisión del servicio de riego en grandes zonas agrícolas sean efectivas, es importante el ajuste de la frecuencia y cantidad del riego con base en factores derivados del suelo, ambiente, planta y manejo del riego, lo cual demanda de modelos de fácil implantación en los sistemas computacionales



(Ojeda-Bustamante *et al.*, 2006). El desarrollo y popularización de las computadoras proporciona herramientas para almacenar grandes volúmenes de datos y realizar cálculos numerosos. Lo anterior permite el desarrollo de sistemas computacionales (programas informáticos-software) para analizar el comportamiento y respuesta biológica de los sistemas de producción agrícola bajo escenarios de diferente manejo hídrico así como en condiciones climáticas contrastantes. Por lo anterior, los modelos calibrados y validados son una herramienta computacional viable como apoyo para la toma de decisiones en la aplicación de insumos y labores agrícolas que se realizan a nivel parcela.

La seguridad alimentaria es un reto mundial y en México es imperante para producir suficiente cantidad de alimentos, con calidad alta y precios accesibles. La agricultura de riego es importante para responder al aumento de la demanda de alimentos de la población que día con día aumenta; aunque la superficie de cultivo ha permanecido casi estable en las últimas cuatro décadas (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2012). El maíz es cultivado en la mayoría de las zonas con la modalidad de producción de riego y temporal, pero México no es autosuficiente e importa alrededor de ocho millones de toneladas (t) anualmente, lo que representa la tercera parte de sus necesidades de grano básico (SAGARPA, 2007). Por las condiciones climáticas que predominan en Durango, solamente se siembra maíz durante el ciclo agrícola primavera-verano (PV) con la finalidad de establecer el cultivo durante un periodo libre de heladas (bajas temperaturas) y aprovechar las condiciones agroecológicas de las distintas regiones de la entidad. Durante el año agrícola 2016, se registró una superficie bajo riego de maíz para grano con 26 757.90 ha y con un rendimiento promedio de 8.02 t ha<sup>-1</sup>, para el caso del maíz forrajero en verde, se registró una superficie de 65,090.77 ha con un rendimiento promedio de 37.11 t ha<sup>-1</sup>. La superficie establecida bajo riego por gravedad, presenta una falta de tecnificación con respecto a la distribución y aplicación en la parcela, puesto que no se mide el gasto de agua que se aplica y se realiza de una forma bastante tradicional, al no usar sifones por ejemplo. El objetivo del trabajo, fue parametrizar un modelo integral que está basado en el concepto grados día (°D) para el pronóstico del riego en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.), mediante su previa calibración y validación para el sistema de riego por gravedad que se utilizan en el área de influencia del Distrito de Riego 052 "Durango".

## **Materiales y métodos**

### **Descripción del trabajo agronómico y del área de estudio**

Los trabajos de parametrización del modelo integral se realizaron durante el ciclo agrícola PV 2015 y 2016, estableciendo parcelas semi-comerciales de maíz en dos sitios experimentales de INIFAP en Durango, los cuales se ubican en los municipios de Canatlán y Durango (Figura 1), específicamente en el Sitio Experimental Canatlán (INIFAP-Canatlán) y Campo Experimental Valle del Guadiana (INIFAP-Durango) (Tabla 1).



**Figura 1.** Ubicación geográfica de los sitios experimentales del INIFAP en Durango.

**Tabla 1.** Coordenadas geográficas de los sitios experimentales donde se parametrizó el modelo integral para el pronóstico del riego en maíz.

| Sitio experimental | Coordenadas geográficas |                     | Altitud (m) |
|--------------------|-------------------------|---------------------|-------------|
|                    | Latitud Norte (LN)      | Longitud Oeste (LW) |             |
| INIFAP-Canatlán    | 24° 33' 14.2"           | -104° 44' 24.4"     | 1,946       |
| INIFAP-Durango     | 23° 59' 18.6"           | -104° 37' 32.4"     | 1,878       |

Se realizó una siembra durante el ciclo agrícola (PV) 2015 en INIFAP-Durango y en INIFAP-Canatlán, con fecha del 19 de junio y el 13 de julio, respectivamente. Donde se utilizó un maíz híbrido con color de grano amarillo (XR20A) y un maíz híbrido con color de grano blanco (XR21), ambos materiales de ciclo intermedio-precoc de la compañía CERES (Tabla 2), mientras que durante el ciclo agrícola PV 2016 solamente se sembró en INIFAP-Durango con una fecha de siembra del 27 de mayo.



**Tabla 2.** Características de los materiales de maíz utilizados en Durango y Canatlán durante el ciclo agrícola PV 2015 y 2016.

| Características de los híbridos | XR20A               | XR21                |
|---------------------------------|---------------------|---------------------|
| Ciclo (tipo duración)           | Intermedio - Precoz | Intermedio - Precoz |
| Días a floración (d)            | 65 - 70             | 66 - 68             |
| Días a madurez (d)              | 132 - 135           | 138 - 140           |
| Días a cosecha (d)              | 160 - 170           | 165 - 175           |
| Altura de la mazorca (m)        | 1.14                | 1.15                |
| Altura de la planta (m)         | 2.45 - 2.75         | 8 - 2.9             |

El clima predominante en los dos sitios experimentales es el templado semiárido, con régimen de lluvias en verano, mostrando variación fuerte de temperatura [BS1 Kw (w) (e)] y la media anual para esa variable es 17.4 °C (García, 1987). La lluvia acumulada durante el año alcanza un promedio de 476 mm, con valores altos entre junio y septiembre (Medina *et al.*, 2005). La evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) media anual en Canatlán es de 4.5 mm/d con un intervalo de 0.2 a 8.1 mm/d mientras que en Durango es de 4.9 mm/d con un intervalo de 0.3 a 8.9 mm/d (INIFAP, 2017). Las características edáficas presentan una clase textural franco arenosa para los dos sitios, con una distribución diferente entre las partículas del suelo para arena (A), limo (L) y arcilla (R), así como de una densidad aparente (pa) y contenido de materia orgánica (MO). Los datos precisos de las principales propiedades físicas y químicas para cada sitio experimental se describen en la tabla 3.

**Cuadro 3.** Propiedades físico-químicas de los sitios experimentales del INIFAP ubicados en Durango y Canatlán.

| Propiedad                               | Sitio experimental del INIFAP |          |
|---|-------------------------------|----------|
|   | Durango                       | Canatlán |
| Arena (%)                               | 62                            | 58       |
| Limo (%)                                | 28                            | 31       |
| Arcilla (%)                             | 10                            | 11       |
| Densidad aparente (g cm <sup>-3</sup> ) | 1.295                         | 1.288    |
| Materia orgánica (%)                    | 0.60                          | 1.42     |
| pH                                      | 8.15                          | 8.28     |

### Descripción del modelo integral para el pronóstico del riego

El modelo integral basado en el concepto grados día (°D) para el pronóstico del riego, fue generado por Ojeda-Bustamante *et al.* (2004). Dicho modelo se utilizó inicialmente para el cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) y posteriormente tuvo más utilización en maíz, sin embargo, también se ha utilizado para los cultivos de algodón (*Gossypium hirsutum* L.) y de nogal, por Sifuentes-Ibarra *et al.* (2015) y Sifuentes-Ibarra *et al.* (2014), respectivamente. Dicho modelo se ajusta automáticamente a las condiciones y variabilidad climática que predominan en el área de estudio, determinando así el momento oportuno para la aplicación del riego, conociendo la cantidad precisa de agua que requiere el cultivo expresada en lámina de riego (L<sub>r</sub>) compensando el déficit de humedad que existe en el suelo durante el desarrollo del cultivo. A continuación se presentan las ecuaciones para determinar los grados día (°D):





$$^{\circ}D = T_a - T_{c-\min}, T_a < T_{c-\max} \quad (1)$$

$$^{\circ}D = T_{c-\max} - T_{c-\min}, T_a \geq T_{c-\max} \quad (2)$$

$$^{\circ}D = 0, T_a \leq T_{c-\min} \quad (3)$$

De acuerdo con las ecuaciones anteriores, para estimar los grados día ( $^{\circ}D$ ) se requiere conocer la temperatura media ambiental diaria ( $T_a$ ), en donde  $T_{c-\min}$  y  $T_{c-\max}$  son las temperaturas mínimas y máximas del aire, respectivamente y dentro de las cuales se desarrolla la planta. Para el caso del maíz, se consideraron unas temperaturas de 8 y 30  $^{\circ}C$ , respectivamente, aunque la especie puede sobrevivir bajo temperaturas adversas entre 0 y 45  $^{\circ}C$ .

La fenología del cultivo toma gran importancia cuando se relaciona con las fechas de aplicación de los riegos y con la acumulación de los grados día ( $\Sigma^{\circ}D$ ), ya que la sensibilidad al estrés hídrico y los requerimientos hídricos varían con la etapa fenológica del cultivo. Mediante el uso de parámetros para calcular las variables como el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ), profundidad de la raíz ( $R_d$ ) y el máximo déficit permitido (MDP), calculándolas en función de los grados día ( $^{\circ}D$ ) y lo cual se aplica para maíz con el objetivo de calcular la calendarización y pronóstico del riego de acuerdo con la fenología. Para estimar el coeficiente del cultivo ( $K_c$ ), se aplica la siguiente ecuación:

$$K_c = K_{\max} \operatorname{erfc}\left\{\left(\frac{X - X_{\max}}{\alpha_1}\right)^2\right\} \quad (4)$$

Si  $K_c < K_{co}$ , entonces  $K_c = K_{co}$

En donde  $K_{\max}$  es el coeficiente de cultivo máximo,  $K_{co}$  es el coeficiente de cultivo inicial,  $X$  es una variable auxiliar que depende de los  $\Sigma^{\circ}D$ ,  $\operatorname{erfc}$  es una función complementaria del error y  $\alpha_1$  es un parámetro de regresión. Para estimar la profundidad de la raíz ( $R_d$ ), se aplica la siguiente ecuación:

$$R_d = R_{do} + (R_{d\max} - R_{do}) \left\{1 - \exp\left(-\frac{(\Sigma^{\circ}D)^2}{\alpha_2}\right)\right\} \quad (5)$$

En donde  $R_{do}$  es la profundidad inicial de la raíz,  $R_{d\max}$  es la profundidad máxima de la raíz,  $\alpha_2$  es un parámetro de regresión y  $\Sigma^{\circ}D$  son los grados día acumulados. Para estimar el máximo déficit permitido (MDP) o también conocido como factor de abatimiento, se utiliza la siguiente ecuación:

$$MDP = \alpha_3 + \alpha_4 K_c \quad (6)$$



En donde  $\alpha_3$  y  $\alpha_4$  son parámetros de regresión, respectivamente. De acuerdo al sistema de riego varían los parámetros de regresión ( $\alpha$ ), por lo cual se tuvieron que realizar evaluaciones en campo para determinar los valores para el sistema de riego por gravedad, estos parámetros pueden obtenerse para riego por aspersión y goteo, según sea el interés del usuario así como el sistema utilizado.

Para alimentar el modelo con los datos climáticos, se utilizó la información registrada por la Red Nacional de Estaciones Agrometeorológicas Automatizadas (RENEAA) que opera el INIFAP (Figura 2) a través del Laboratorio Nacional de Modelaje y Sensores Remotos, ubicado en el Campo Experimental Pabellón, Aguascalientes (INIFAP, 2017).



**Figura 2.** Distribución de las estaciones agrometeorológicas automatizadas de la RENEAA a nivel nacional.

Para conocer la capacidad de campo ( $\theta_{CC}$ ) y el punto de marchitez permanente ( $\theta_{PMP}$ ) de forma empírica, se utilizan las siguientes ecuaciones con la finalidad de estimar dos de las constantes de humedad que son necesarias para conocer la humedad aprovechable del agua en el suelo (Green & Ampt, 1911; Rawls and Brakensiek, 1983):

$$\theta_{CC} = 0.3486 - 0.0018 (A) + 0.0039 (R) + 0.0228 (MO) - 0.0738 (pa) \quad (7)$$

$$\theta_{PMP} = 0.0854 - 0.0004 (A) + 0.0044 (R) + 0.0122 (MO) - 0.0182 (pa) \quad (8)$$



Donde las fracciones texturales de arena (A), limo (L) y arcilla (R) están dadas en por ciento (%), MO se refiere al contenido de materia orgánica (%),  $\rho_a$  es la densidad aparente ( $\text{gcm}^{-3}$ ) y las constantes de humedad ( $\theta_{CC}$  y  $\theta_{PMP}$ ) se expresan en unidades volumétricas ( $\text{cm}^{-3}\text{cm}^{-3}$ ).

## Análisis y discusión de resultados

### Manejo del riego por el productor vs. Manejo del riego a nivel experimental

En Durango, generalmente el productor aplica de tres a cuatro riegos durante el ciclo del cultivo. Sin embargo, no es suficiente para satisfacer la demanda hídrica del maíz y el rendimiento se ve mermado en comparación con un manejo y abastecimiento oportuno del riego. Lo anterior, es producto de la falta de tecnificación de la agricultura en la región, puesto que durante el ciclo del cultivo se presenta la temporada de lluvias y en muchas ocasiones no cumple con el requerimiento hídrico del cultivo, ya que no se realizan mediciones de las entradas de agua al suelo (riego + precipitación).

A continuación se presentan los calendarios generados mediante el pronóstico del riego con el modelo integral basado en el concepto grados día ( $^{\circ}\text{D}$ ), para los sitios experimentales y ciclos agrícolas. Cabe mencionar que los calendarios se utilizaron para los dos materiales de maíz sembrados, puesto que la diferencia entre sus días a madurez, no influyó en el número o intervalos de riego.

**Tabla 4.** Pronóstico del riego en INIFAP-Durango durante el ciclo PV 2015.

| No. Riego | Días al riego | IR | Lámina neta (mm) | Lámina bruta (mm) |
|-----------|---------------|----|------------------|-------------------|
| 1*        | 0             | 0  | 105.76           | 132.20            |
| 2         | 44            | 44 | 43.92            | 54.89             |
| 3         | 57            | 13 | 57.02            | 71.28             |
| 4         | 68            | 11 | 60.37            | 75.46             |
| 5         | 78            | 10 | 65.54            | 81.93             |
| 6         | 92            | 14 | 68.80            | 86.00             |
| 7         | 108           | 16 | 73.44            | 91.80             |
| Total     |               |    | 474.85           | 593.56            |

\* = riego de asiento, IR = intervalo de riego

**Tabla 5.** Pronóstico del riego en INIFAP-Canatlán durante el ciclo PV 2015.

| No. Riego | Días al riego | IR | Lámina neta (mm) | Lámina bruta (mm) |
|-----------|---------------|----|------------------|-------------------|
| 1*        | 0             | 0  | 119.94           | 149.92            |
| 2         | 37            | 37 | 47.44            | 59.29             |
| 3         | 52            | 15 | 63.23            | 79.03             |
| 4         | 67            | 15 | 71.76            | 89.70             |
| 5         | 80            | 13 | 73.46            | 91.83             |
| 6         | 101           | 21 | 80.02            | 100.02            |
| 7         | 125           | 24 | 84.58            | 105.72            |
| Total     |               |    | 540.42           | 675.53            |

\* = riego de asiento, IR = intervalo de riego





La eficiencia de aplicación (EA) de los riegos fue de 80 % implementando la utilización de los sifones. Para el caso de la EA con los productores, generalmente oscila entre un 35 y 45 % para la zona de influencia del DR-052.

**Tabla 6.** Pronóstico del riego en INIFAP-Durango durante el ciclo PV 2016.

| No. Riego | Días al riego | IR | Lámina neta (mm) | Lámina bruta (mm) |
|-----------|---------------|----|------------------|-------------------|
| 1*        | 0             | 0  | 105.76           | 132.20            |
| 2         | 9             | 9  | 9.43             | 11.79             |
| 3         | 33            | 24 | 41.13            | 51.41             |
| 4         | 47            | 14 | 56.82            | 71.03             |
| 5         | 58            | 11 | 62.24            | 77.80             |
| 6         | 70            | 12 | 64.63            | 80.79             |
| 7         | 92            | 22 | 70.12            | 87.65             |
| 8         | 114           | 22 | 75.95            | 94.94             |
| Total     |               |    | 486.09           | 607.61            |

\* = riego de asiento, IR = intervalo de riego

A pesar de que existe resistencia por parte de los agricultores en cambiar la forma tradicional de regar debido a los altos costos de producción y por la ausencia de reglas simples o concretas que son el producto de la complejidad de todos los factores que modifican los requerimientos hídricos del cultivo, es importante considerar el riego en tres partes esenciales para tener una mayor eficiencia en el manejo del agua: 1) antes, 2) durante y 3) después del riego; la primera parte está asociada con el pronóstico del riego que consiste en determinar el momento y cantidad oportuna del mismo, la segunda es propiamente la aplicación del riego al cultivo y la tercera consiste en evaluar si éste se aplicó eficientemente. Por lo anterior y debido a la gran necesidad de generar automáticamente programas de riego para los cultivos de acuerdo con su fenología, Ojeda-Bustamante *et al.* (2004) generaron el concepto grados día (°D) con el propósito de pronosticar y calendarizar el riego considerando la relación agua-suelo-planta-atmósfera (RASPA).

La diferencia entre el manejo del riego con un productor y el manejo experimental, es la forma de introducir el agua en la parcela. El productor comúnmente abre parte del bordo para que pueda acceder el agua a través de los surcos (Figura 3) mientras que a nivel experimental se utilizaron sifones para controlar el gasto y la cantidad de agua durante el riego aplicado (Figura 4).



**Figura 3.** Manejo tradicional del riego en Durango por los productores de maíz.



**Figura 4.** Manejo del riego a nivel experimental en maíz implementado por el INIFAP.



## Parámetros obtenidos para el modelo integral

De acuerdo con Ojeda-Bustamante *et al.* (2006), los parámetros generados para maíz son bajo condiciones específicas del norte de Sinaloa (DR-063 “Guasave”, DR-075 “Río Fuerte” y DR-076 “Valle del Carrizo”), donde se utilizan diferentes híbridos con ciclo tardío-intermedio y tardío (hasta 180 días a madurez fisiológica). Dichos materiales son cultivados bajo diferentes condiciones edáficas-climáticas en comparación con las condiciones que predominan en el DR-052 “Durango”. A continuación se presenta comparativamente los parámetros del modelo integral para cada estudio.

**Tabla 7.** Comparativa de parámetros generados en Sinaloa y Durango.

| Parámetro                      | Regiones con parámetros del modelo integral |                       |
|--------------------------------|---|-----------------------|
|                                | Sinaloa                                     | Durango               |
| $K_{max}$                      | 1.25  | 1.25                  |
| $K_{co}$                       | 0.20  | 0.20                  |
| $X_{Kmax}$                     | 0.59  | 0.59                  |
| $R_{do}$                       | 0.07 m                                      | 0.07 m                |
| $R_{dmax}$                     | 1.00 m                                      | 1.00 m                |
| $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$ | 1641 °D, 0.45, 527 °D                       | 1500 °D, 0.45, 527 °D |
| $\alpha_3$                     | 0.80 (gravedad)                             | 0.80 (gravedad)       |
| $\alpha_4$                     | 0.10  | 0.10                  |

La acumulación diaria de los °D es una variable de gran valor predictivo para el manejo del riego, puesto que la maduración de los materiales comerciales de maíz varía de 1150 a 1760 para valores acumulados de °D. Las variedades se pueden clasificar por los requerimientos acumulados de °D, las de ciclo corto (precoz) de 1150 a 1315 °D, las de ciclo intermedio de 1315 a 1590 °D, y las de ciclo largo (tardío) de 1590 a 1760 °D (Neild y Newman, 1987). Se obtuvieron ligeras diferencias en la acumulación de °D por cada material y lo cual resultó en diferencia en días de acuerdo al desarrollo fenológico de los maíces utilizados.

De acuerdo con Ojeda-Bustamante *et al.* (2006), el desarrollo de muchos organismos es controlado principalmente por la temperatura. Por lo tanto, los °D son una medida indirecta del crecimiento y desarrollo de plantas e insectos, que representan la integración de la temperatura ambiental entre dos temperaturas limitantes, las cuales definen el intervalo en el cual un organismo se encuentra activo. Puesto que fuera de este intervalo el organismo no presenta un desarrollo apreciable o puede morir.

Por lo anterior, para Sinaloa se utilizan unas temperaturas mínimas y máximas de 10 y 30 °C, respectivamente. Mientras que para Durango se redujo la temperatura mínima a 8 °C por cuestiones climáticas que predominan en la región.

## Conclusiones

El uso del modelo grados día (°D) en la calendarización y pronóstico del riego resultó ser una excelente herramienta para normalizar los requerimientos de riego



del cultivo a las condiciones temporales del clima, ya que en forma automática se ajustan las estimaciones a través del modelo.

Es importante manejar adecuadamente los sistemas de riego, mediante evaluaciones previas en las eficiencias de aplicación y distribución del riego en la parcela para obtener mejores eficiencias en el uso del agua porque este tipo de modelos no tendrían el impacto esperado al momento de pronosticarse el riego si en campo no se ejecuta correctamente.

### **Agradecimientos**

El presente trabajo se desarrolló dentro del proyecto: Parametrización de modelos para el pronóstico del riego en tiempo real a través de un portal web y dispositivos móviles, con clave 1123333087 y financiado con Fondos Fiscales INIFAP.

### **Referencias Bibliográficas**

- Allen R., L. Pereira, D. Raes, M. Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. FAO. Riego y Drenaje 56. Roma, Italia. 298 p.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2012. Base de datos de las estadísticas de los distritos de riego. Gerencia de distritos de riego. México, D.F.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2016. Estadísticas del Agua en México. Edición 2016. Comisión Nacional del Agua. México D.F. 275 p.
- Doorenbos J., A. H. Kassam. 1979. Yield response to water. FAO. Irrigation and Drainage. Paper no. 33. Rome, Italy. 193 p.
- Flores-Gallardo H., W. Ojeda-Bustamante, H. Flores-Magdaleno, E. Mejía-Sáenz, E. Sifuentes-Ibarra. 2012. Grados día y la programación integral del riego en el cultivo de papa. *Terra Latinoamericana*. 30: 59-67.
- Flores-Gallardo H., W. Ojeda-Bustamante, H. Flores-Magdaleno, E. Sifuentes-Ibarra, E. Mejía-Sáenz. 2013. Simulación del rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) en el norte de Sinaloa usando el modelo AquaCrop. *Agrociencia*. 47: 347-359.
- Flores-Gallardo H., E. Sifuentes-Ibarra, H. Flores-Magdaleno, W. Ojeda-Bustamante, C. R. Ramos-García. 2014. Técnicas de conservación del agua en riego por gravedad a nivel parcelario. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 5: 241-252.
- García M. E. 1987. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). 4a. ed. Enriqueta García de Miranda. México, D. F. 217 p.
- Green W. A., G. A. Ampt. 1911. Studies on soils physics: 1. The flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Science*. 4(1): 1-24.
- INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias). 2017. Red Nacional de Estaciones Agrometeorológicas Automatizadas. <http://clima.inifap.gob.mx/redinifap/>
- Medina G. G., G. Díaz P., J. López H., J. A. Ruiz C., M. Marín S. 2005. Estadísticas climatológicas básicas del estado de Durango (Periodo 1961-





- 2003). Libro Técnico Núm. 1. SAGARPA-INIFAP-CIRNOC-Campo Experimental Valle del Guadiana. Durango, México. 224 p.
- Ojeda-Bustamante W., E. Sifuentes-Ibarra, D. C. Slack, M. Carrillo. 2004. Generalization of irrigation scheduling parameters using the growing degree days concept: application to a potato crop. *Irrigation and Drainage*. 53: 251-261.
- Ojeda-Bustamante W., E. Sifuentes-Ibarra, H. Unland-Weiss. 2006. Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa, México. *Agrociencia*. 40: 13-25.
- Ojeda-Bustamante W., E. Sifuentes-Ibarra, A. Rojano-Aguilar, M. Iñiguez-Covarrubias. 2012. Adaptación de la agricultura de riego ante el cambio climático. *In: P. F. Martínez-Austria y C. Patiño-Gómez (eds.). Efectos del cambio climático en los recursos hídricos en México. Vol. IV. IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). Pp. 71-119.*
- Rawls W. J., D. L. Brakensiek. 1983. A procedure of predict Green and Ampt infiltration parameters. *In: proceedings of the national conference on advances in infiltration. American Society of Agricultural Engineering*. 102-112.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2013. Atlas agroalimentario 2013. SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). México, D.F. 154 p.
- Sifuentes I. E., W. Ojeda B. 2005. Métodos de conservación del agua en riego superficial (Una alternativa para incrementar la eficiencia en el uso del agua). *In: memorias del XIII congreso nacional de irrigación (Mesa 4: Innovaciones tecnológicas, de información y servicios en Internet). Acapulco, Guerrero, México.*
- Sifuentes-Ibarra E., J. del R. Ruelas-Islas, J. J. Soto-Flores, J. Macías-Cervantes, C. A. Palacios-Mondaca. 2014. Planeación del riego en el cultivo de algodónero (*Gossypium hirsutum* L.), mediante un modelo de programación integral en el Distrito 075, Sinaloa, México. *Scientia Agropecuaria*. 5: 93-102.
- Sifuentes-Ibarra E., J. A. Samaniego-Gaxiola, A. Anaya-Salgado, J. H. Núñez-Moreno, B. Valdez-Gascón, R. G. Gutiérrez-Soto, J. del R. Ruelas-Islas, J. Macías-Cervantes. 2015. Programación del riego en nogal pecanero (*Carya illinoensis*), mediante un modelo integral basado en tiempo térmico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 6: 1893-1902
- Wanjura D. F., D. R. Upchurch. 2000. Canopy temperature characterizations of corn and cotton water status. *Transactions of the ASAE*. 43(4): 867-875.