



## **HUMEDAD DEL SUELO PERMISIBLE (MDP) PARA EL MANEJO DEL RIEGO POR GOTEO EN PAPA (*Solanum tuberosum* L.) MEDIANTE UN MODELO INTEGRAL**

**Sifuentes-Ibarra Ernesto<sup>1\*</sup>; Merino-Leyva Rosa Isabel<sup>2</sup>; Ruíz-Pérez Vladimir<sup>2</sup>; Ojeda-Bustamante Waldo<sup>3</sup>; Flores-Gallardo Hilario<sup>4</sup>; Macías-Cervantes Jaime<sup>5</sup>**

<sup>1</sup> Estudiante de Doctorado en Ciencias y Tecnología del Agua-MTA e investigador del Campo Experimental Valle del Fuerte-INIFAP. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos, México, C.P. 62550

eblnat68@gmail.com - +52 (777) 329-3600 Ext. 136 (\*Autor de correspondencia)

<sup>2</sup> Facultad de Agricultura del Valle del Fuerte. Universidad Autónoma de Sinaloa. Calle 16 y Avenida Japaraqui, Juan José Ríos, Sinaloa, México, C.P. 81110

<sup>3</sup> Coordinación de Riego y Drenaje. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos, México, C.P. 62550.

<sup>4</sup> Campo Experimental Valle del Guadiana-INIFAP. El Mezquital, Durango 4, Camino Real, 34170 Durango, Dgo.

<sup>5</sup> Campo Experimental Valle del Fuerte-INIFAP. Carretera México-Nogales km 1609, Juan José Ríos, Sinaloa, México, C.P. 81110

### **Resumen**

En Sinaloa se establecen anualmente alrededor de 14,000 ha de papa con rendimiento de 27 a 35 t ha<sup>-1</sup>, sin embargo, el manejo tradicional del cultivo es cada vez menos funcional debido a la alta variabilidad climática que altera su ciclo fenológico y requerimientos de agua. Aunque se han desarrollado modelos de riego en tiempo real para este cultivo, su aplicación se ha limitado a riego por gravedad y aspersión por lo que se requiere información para riego por goteo. En el presente estudio se evaluaron tres niveles (N) de máximo déficit permitido (MDP) de un modelo integral de programación del riego en tiempo real basado en el concepto grados-día, en las variedades Fianna, Ágata y Atlantic en un sistema de riego por goteo. Los niveles fueron 0.15, 0.30 y 0.45 en un diseño en parcelas divididas con cuatro repeticiones, donde la parcela grande fue MDP y la chica las variedades. La evaluación del riego se realizó en términos de eficiencia de aplicación (EA) y el rendimiento en cantidad y calidad. Se estimó un consumo de agua de 29.5, 28.8 y 28.4 cm para N1, N2 y N3, respectivamente distribuidos en 14, 8 y 5 riegos de auxilio. La variedad Atlantic resultó muy sensible a los tratamientos, reduciendo 8 t ha<sup>-1</sup> en N3 con respecto al N1. La sensibilidad de Fianna fue moderada seguida de Ágata, que resultó más tolerante al estrés.

**Palabras claves:** tiempo térmico, variabilidad climática, rendimiento y calidad.



## Introducción

En México la papa se cultiva anualmente en 64,000 ha, con una producción de 1.7 millones de toneladas y un rendimiento promedio de 27 t ha<sup>-1</sup> (Onamu *et al.*, 2015), además, es uno de los cultivos con mayor impacto social ya que participan 8 700 productores, que benefician a 20 000 familias, generando más de 17 500 empleos directos y 51 600 indirectos (Luque *et al.*, 2011).

El estado de Sinaloa es el principal productor a nivel nacional llegando a establecerse más de 12,000 ha anualmente (31.09% de la superficie nacional) (SIAP, 2012), principalmente en las áreas de riego de la zona norte donde se establece en el ciclo otoño-invierno desde principios de octubre hasta fines de diciembre, siendo noviembre la mejor época de siembra desde el punto de vista de rendimiento. En riego por gravedad se le aplican de 5 a 7 riegos de auxilio con una lámina total de 60 cm y un intervalo de 10 a 27 días, una eficiencia media en el uso de agua de 5 kg m<sup>-3</sup>, duración de ciclo de 110 a 120 días y rendimiento promedio de 27 a 35 t ha<sup>-1</sup> de tubérculos frescos (<http://www.edistritos.com/DR>). Las variedades más comunes para el mercado de consumo fresco son Fianna y Ágata, mientras que para uso industrial son Atlantic y FL1867.

La calidad y cantidad de tubérculos están relacionados con una buena calendarización del riego, cambios drásticos en la humedad del suelo debido a riegos tardíos y pesados, puede resultar en el agrietamiento o la formación de corazones negros (necrosis interna) en tubérculos. Lo anterior confirma el hecho que la alta frecuencia del riego por aspersión o goteo reduce la ocurrencia de malformación de tubérculos (FAO 1986). Después del desvare, debe haber un contenido de humedad idóneo (>50% del valor de capacidad de campo) que evite el agrietamiento del suelo y exponga los tubérculos superficiales al ataque de plagas y enfermedades que puedan dañarlo como la palomilla de la papa (*Phthorimaea operculella* Zeller).

Tradicionalmente la calendarización del riego se ha basado en el monitoreo de la humedad del suelo en la zona radical durante el desarrollo del cultivo. Al momento del riego, el contenido de humedad alcanza un contenido de humedad máximo y éste disminuye gradualmente hasta alcanzar un contenido de humedad predefinido o crítico conocido como máximo déficit permitido (MDP), de esta manera la humedad del suelo fluctúa entre capacidad de campo y MDP, sin embargo, la variabilidad climática reportada en las zonas de riego de México como la región noroeste, está alterando la duración de los ciclos de cultivo, por lo que se debe incorporar el concepto de días grado crecimiento a las técnicas de programación del riego para acoplar las demandas de agua al desarrollo del cultivo (Ojeda *et al.*, 2006).

Recientemente se han desarrollado sistemas inteligentes para programación del riego bajo este concepto como el programa IRRIMODEL © (Sifuentes *et al.*, 2015) operado a través de una plataforma computacional y que utiliza un modelo de programación integral del riego generado y validado en el norte de Sinaloa (Ojeda *et al.*, 2004). El modelo integra los parámetros: coeficiente de cultivo (Kc), profundidad dinámica de raíz



(Pr) y máximo déficit permitido (MDP), en función de tiempo térmico o grados día crecimiento ( $^{\circ}D$ ); además de parámetros de suelo, clima y manejo. Sin embargo, su aplicación en el cultivo de papa se ha enfocado solo a riego por gravedad y aspersión por lo que se requiere explorarlo en riego por goteo. En el presente estudio se evaluó el parámetro MDP del modelo integral en tres variedades de papa bajo riego por goteo, para conocer el valor que promueva un mayor rendimiento y calidad del cultivo y una mayor eficiencia en el uso del agua.

## Materiales y Métodos

El trabajo se desarrolló en el Campo Experimental Valle del Fuerte del INIFAP, ubicado en el norte de Sinaloa en los  $25^{\circ} 45'49''$  Latitud Norte y  $-108^{\circ} 51'41''$  Longitud Oeste, en la parte central del distrito de riego 075 Río Fuerte a una altura de 12 msnm, donde se encuentra la zona productora de papa más importante del país, en un suelo típico de la región de textura arcillosa, pobre en materia orgánica pendiente plana sin problemas de sales solubles.

La temperatura media anual del estado se encuentra en el rango de 24 a 26  $^{\circ}C$  mientras que la distribución espacial de la precipitación es muy heterogénea existiendo zonas con valores desde poco menos de 200 mm al año en el extremo NW, hasta casi 1100 mm al año en las zonas colindantes con los estados de Durango y Chihuahua, haciéndose necesario el riego sobre todo en los valles agrícolas donde se tienen los registros más bajos, como es el caso de la zona donde se desarrolló el presente estudio (IMTA-INIFAP, 2010).

El trabajo se estableció en un lote con riego por goteo de 0.5 ha donde se evaluaron en tres variedades comerciales de papa, tres valores del parámetro MDP del modelo de programación del riego basado en días grado crecimiento ( $^{\circ}D$ ) o tiempo térmico. El modelo además de MDP integra los parámetros coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) y profundidad dinámica de la raíz ( $P_r$ ). La **Tabla 1** muestra los valores de los parámetros del modelo usados en la evaluación.

**Tabla 1.** Parámetros del modelo de programación integral del riego para el cultivo de papa bajo riego por gravedad y aspersión, en el norte de Sinaloa, México (Ojeda *et al.*, 2004).

Variable	Función	Parámetro
Coeficiente de cultivo	$K_c = K_{\max} \operatorname{erfc}\left(\frac{x - x_{K_{\max}}}{\alpha_1}\right)^2$ <p>si <math>K_c &lt; K_{c0}</math>, entonces <math>K_c = K_{c0}</math></p>	$K_{\max} = 1.3$ $XK_{\max} = 0.6$ $\alpha_1 = 0.45$ $K_{c0} = 0.2$
Profundidad radical	$P_r = P_{r0} + (P_{r\max} - P_{r0}) \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{(GDA_n)^2}{\alpha_2^2}\right] \right\}$	$P_{r0} = 0.15 \text{ m}$ $P_{r\max} = 0.7 \text{ m}$ $\alpha_2 = 600$
Máximo déficit permitido	$MDP = \alpha_3 - \alpha_1 K_c$	$\alpha_3 = 0.15 \text{ (N1)}$ $\alpha_3 = 0.30 \text{ (N2)}$ $\alpha_3 = 0.45 \text{ (N3)}$ $\alpha_4 = 0.1$



Se utiliz3 un dise1o experimental en parcelas divididas, donde las parcelas grandes /Factor A) fueron los niveles de MDP y las sub-parcelas fueron las variedades (Factor B), generando un total de nueve tratamientos (T) distribuidos aleatoriamente en cuatro repeticiones, para tener un total de 36 parcelas experimentales, formadas de cuatro camas de 0.8 m de ancho por 15 m de largo (48 m<sup>2</sup>). Los niveles (N) de MDP fueron 0.15, 0.30 y 0.45 y las variedades evaluadas fueron Atlantic, 1gata y Fianna. El cultivo se estableci3 el 23/10/15 con una densidad de siembra de 4 a 5 tub3rculos-semilla por metro lineal para tener una densidad de siembra de 50,000 semillas ha<sup>-1</sup>.

La programaci3n de los riegos en cada nivel de MDP, se realiz3 con el m3todo del balance h3drico a trav3s del programa IRRIMODEL© (Sifuentes *et al.*, 2015), el cual es operado a trav3s de internet y utiliza el modelo integral de programaci3n del riego descrito en la tabla anterior, adem1s de informaci3n clim1tica en tiempo real y otras variables agron3micas.

Los riegos se evaluaron en t3rminos de eficiencia de aplicaci3n (EA) utilizando la ecuaci3n:

$$EA = L_n / L_b \quad (1)$$

Donde  $L_n$  representa la l1mina neta o requerimiento de riego (cm) determinado con el modelo y  $L_b$  la l1mina aplicada (cm) medida con el sistema de riego. Se monitore3 quincenalmente la fenolog1a del cultivo usando la metodolog1a reportada por Jefferies y Lawson (1991) y adaptada por Sifuentes *et al.* (2013), donde se consideran las siguientes fases: 1) Brotaci3n, 2) emergencia, 3) inicio de estolonizaci3n, 4) elongaci3n de estolones, 5) inicio de tuberizaci3n (di1metro >1 cm), 6) desarrollo de tub3rculos (di1metro de 3 a 5 cm), 7) tub3rculos desarrollados (di1metro > 5 cm), 8) desvare (c1scara completa con di1metro de 7 cm) y 9) Cosecha. En cada monitoreo se calcularon los grados-d1a (°D) con la misma plataforma, a partir de la temperatura media diaria del aire ( $T_a$ ) utilizando las siguientes ecuaciones (Ojeda *et al.*, 2006).

$$^{\circ}D = T_a - T_{cmin}, \text{ si } T_a < T_{cmax} \quad (2)$$

$$^{\circ}D = T_c - \max(T_c - min, \text{ si } T_a \geq T_c - max) \quad (3)$$

$$^{\circ}D = 0, \text{ si } T_a \leq T_c - min \quad (4)$$

Donde  $T_{c-min}$  y  $T_{c-m1x}$  son las temperaturas umbrales m1nima y m1xima, que para el cultivo de la papa son 2 y 29°C respectivamente.

El desvare o quema del follaje se realiz3 utilizando herbicida Velquat (i.a. Paraquat 25%), el 10/02/2016 a los 1 754 grados-d1a acumulados ( $\sum^{\circ}D$ ), mientras que la cosecha se realiz3 el 11/03/2016 a los 2 282  $\sum^{\circ}D$  una vez que la c1scara del tub3rculo tuvo la consistencia adecuada. La extracci3n de tub3rculos del suelo se realiz3 en forma



mecánica con tractor, utilizando vertederas de 18 pulgadas montadas en una barra-soporte horizontal.

Después de lo anterior, en cada parcela experimental se evaluaron las variables rendimiento y calidad recolectando manualmente los tubérculos que quedaron dentro de una área de 9 m<sup>2</sup> (parcela útil) formada de las dos camas centrales de 5 m de largo (2 x 0.8 x 5 m). La Tabla 2 muestra la referencia utilizada para la clasificación por calidad con base en el diámetro ecuatorial de tubérculos (<http://www.conpapa.org.mx/>).

**Tabla 2.** Clasificación del tubérculo con base en el diámetro ecuatorial

Calidad	Diámetro (mm)
Primera	71-80
Segunda	51-70
Tercera	41-50
Cuarta	31-40
Quinta	21-30
Gigantes	>80
Deformes	---

## Resultados y Discusión

### Requerimientos de riego y eficiencia en el uso del agua

En la **Tabla 3** se presenta el resumen de riegos aplicados generados con los tres niveles de MDP evaluados. Se observa que para MDP = 0.15 se generaron 14 riegos de auxilio con intervalo máximo de 22 días e intervalo mínimo de 5, mientras que en MDP = 0.45 fueron de 36 y 13 respectivamente. Con respecto a los requerimientos de riego el nivel bajo tuvo un requerimiento de riego de 29.5 cm, mayor al nivel medio y alto, debido al menor nivel de estrés sometido del cultivo, el cual afecta directamente la evapotranspiración de este.

Se observa también una mayor eficiencia de aplicación en los niveles bajo y medio con valores de 90.6 y 90% respectivamente, mientras que en el nivel alto de MDP solo fue de 81.5%, debido a la reducción de Ln por mayor estrés y mayor Lb derivada de un mayor tiempo de riego utilizado para formar el bulbo de mojado.

**Tabla 3.** Riegos aplicados, Lámina neta (Ln), Lámina bruta (Lb) y Eficiencia de aplicación (EA) para tres niveles de máximo déficit permitido (MDP) en papa bajo riego por goteo, en el norte de Sinaloa, México.

Máximo déficit permitido (%)	Número de riegos	Intervalo de riegos máximo (días)	Intervalo de riegos mínimo (días)	Lámina neta (cm)	Lámina bruta (cm)	Eficiencia de aplicación (%)
15	14	22	5	29.5	32.5	90.6
30	8	30	8	28.8	32.0	90.0
45	5	36	13	28.4	34.8	81.5



## Rendimiento

En la **Tabla 4** se presentan los rendimientos promedio obtenidos en las tres variedades con los tres niveles de estrés hídrico, donde se puede observar una respuesta diferenciada para cada variedad, encontrándose los valores más altos en el nivel más bajo de MDP, donde Fianna, Ágata y Atlantic alcanzaron valores de 30.3, 28.4 y 26.8 t ha<sup>-1</sup> respectivamente y una media general de 28.5 t ha<sup>-1</sup>.

Con el nivel medio de estrés (MDP = 0.30) el rendimiento se redujo en diferentes proporciones en cada variedad con respecto a los obtenidos con el nivel más bajo de estrés; la variedad Atlantic fue la que tuvo la caída más alta con 20.4%, seguida de Fianna y Ágata con 14.8 y 10.5% respectivamente. En el nivel más alto de estrés (MDP = 0.45), Fianna reportó la caída de rendimiento más alta con 26.4%, seguida de Atlantic con 22.8 y Ágata con solo el 2.1% con respecto al tratamiento con el nivel más bajo.

**Tabla 4.** Rendimientos obtenidos en tres variedades de papa sometidas a tres niveles de estrés hídrico en riego por goteo, en el norte de Sinaloa, México.

Factor A (MDP)	Factor B (Variedad)	Rendimiento (t ha <sup>-1</sup> )	Diferencia (t ha <sup>-1</sup> )	Diferencia (%)
0.15	Fianna	30.3	0.0	0.0
	Ágata	28.4	0.0	0.0
	Atlantic	26.8	0.0	0.0
	<b>Media</b>	<b>28.5</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>
0.30	Fianna	25.8	-4.5	-14.8
	Ágata	25.4	-3.0	-10.5
	Atlantic	21.3	-5.5	-20.4
	<b>Media</b>	<b>24.2</b>	<b>-4.3</b>	<b>-15.1</b>
0.45	Fianna	22.3	-8.0	-26.4
	Ágata	27.8	-0.6	-2.1
	Atlantic	20.7	-6.1	-22.8
	<b>Media</b>	<b>23.6</b>	<b>-4.9</b>	<b>-17.2</b>

## Calidad de la producción

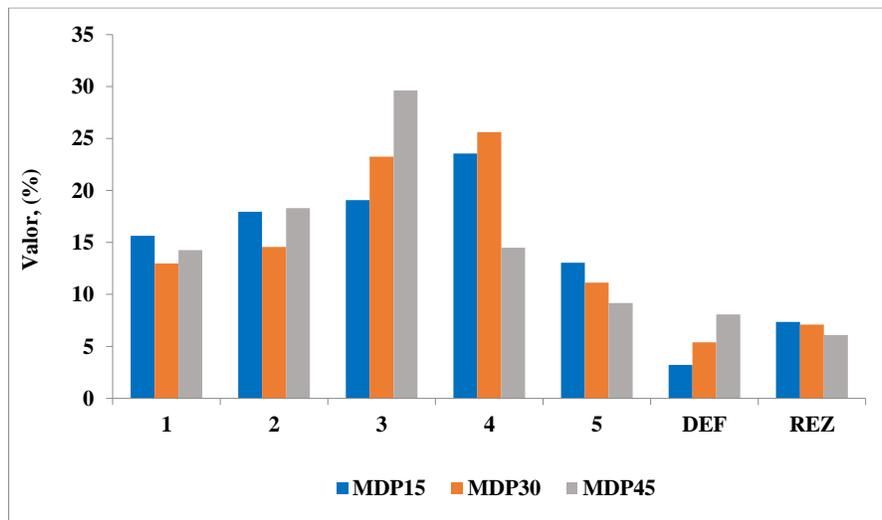
La variable calidad de la producción es de las más importantes para la comercialización y generación de ingresos directos e indirectos para todos los actores de esta cadena productiva, ya que cada tipo de calidad recibe un precio de mercado, donde el más alto lo tienen los tubérculos de primera y los más bajos los de cuarta y quinta; los deformes y rezagas (tubérculos enfermos o con daño mecánico) no se comercializan por lo que se consideran mermas de la producción.

En este trabajo se encontró un efecto importante del MDP para cada variedad en esta variable, como se puede observar en **las Figuras 1 a 3**. En general en las variedades

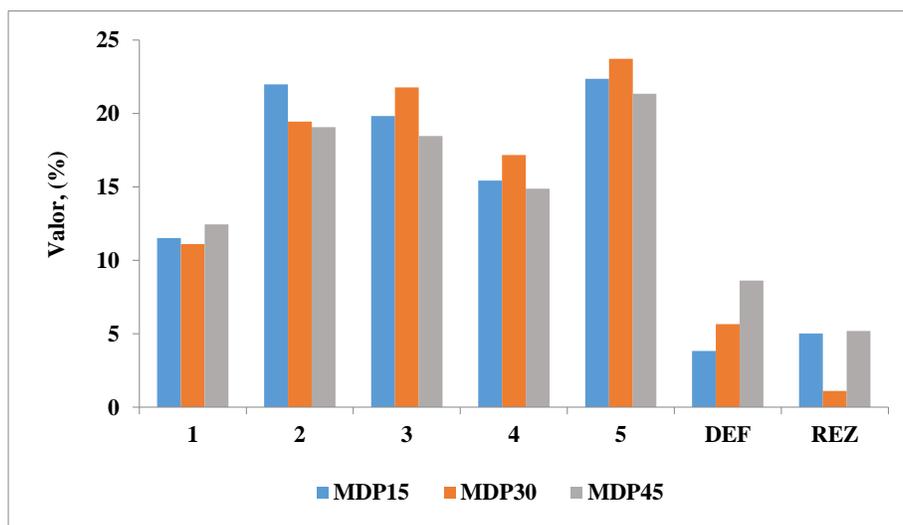


Atlantic y Fianna el nivel bajo de MDP promovió el incremento de tubérculos de primera y segunda calidad, mientras que los niveles medio y alto promovieron los tubérculos de tercera y cuarta calidad.

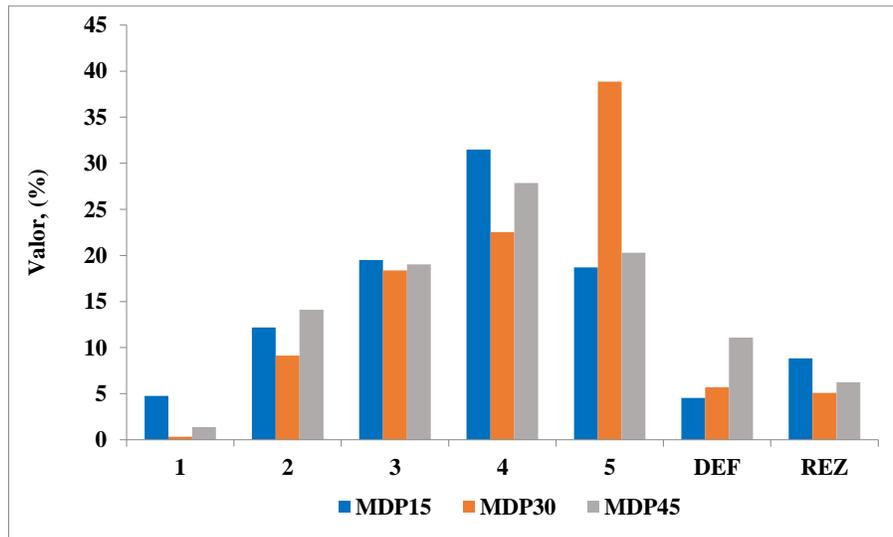
Para Ágata en el nivel más bajo de MDP solo se obtuvo el 5% de tubérculos de primera, 12% de segunda y 19% de tercera, observándose un valor de 32% en los de cuarta, lo cual puede deberse a un desarrollo de tubérculos más lento que los de las otras dos variedades. Con el nivel medio no se reportaron tubérculos de primera, reduciéndose a 9% los de segunda y manteniéndose en valores similares al nivel bajo los de tercera. Se observa una reducción de tubérculos de cuarta y un valor de casi 40% en los de quinta. Con el nivel más alto de MDP solo hubo una producción del 1% de tubérculos de primera, mientras que los de segunda subieron a 15% y en los de tercera fue similar a los otros niveles.



**Figura 1.** Distribución de la calidad de la producción de papa variedad Atlantic, sometida a tres niveles de máximo déficit permitido (MDP)



**Figura 2.** Distribución de la calidad de la producción de papa variedad Fiana, sometida a tres niveles de estrés hídrico en el norte de Sinaloa, México



**Figura 3.** Distribución de la calidad de la producción de papa variedad Ágata, sometida a tres niveles de estrés hídrico en el norte de Sinaloa, México

Respecto a los tubérculos deformes, en las tres variedades se observó una respuesta positiva que indica que a mayor estrés hídrico aumenta la proporción de tubérculos deformes, alcanzando valores hasta de 10% de la producción en el nivel alto. En las rezagas no se encontró un patrón uniforme, sin embargo, en las tres variedades coinciden los valores más altos con el valor bajo de estrés, probablemente asociado a un ambiente más húmedo generado por los riegos frecuentes que favorece el desarrollo de patógenos. Con los niveles de estrés medio y alto la tendencia fue a disminuir la rezaga, situación contraria a la anterior, por lo que en la práctica se deben analizar los diferentes escenarios de manejo de estrés, lo cual coincide con lo reportado por la FAO.

## Conclusiones

- El mayor número de riegos derivado de MDP bajo reduce el estrés hídrico del cultivo, lo cual se refleja en un ligero aumento de los requerimientos de riego ( $L_n$ ) y eficiencia de aplicación.
- La respuesta en rendimiento de las tres variedades al MDP fue diferenciada, siendo la más sensible Atlantic, seguida de Fiana y Ágata. Este comportamiento indica viabilidad para utilizar sistemas de riego por goteo en las variedades Atlantic y Fiana. En la variedad Ágata puede seguir manejándose bajo riego por aspersión y gravedad y puede ser una buena opción para períodos de baja disponibilidad hídrica.
- Se encontraron respuestas importantes del efecto del MDP en la calidad de tubérculos. En general, el nivel bajo promovió tubérculos de primera y segunda calidad, sin embargo incrementó las rezagas. El valor alto promovió tubérculos deformes.
- Se cuenta con el modelo integral para programación del riego en papa bajo riego por goteo, principalmente para Atlantic y Fiana en Sinaloa.



## Referencias Bibliográficas

FAO. (1986). Yield response to water. Irrigation and Drainage Paper No. 33. Roma, Italia. 189 pp.

<http://www.edistritos.com/DR>

<http://www.infoaserca.gob.mx/claridades/revistas/057/ca057.pdf>. Consulta: 18/Mayo/2017.

<http://www.conpapa.org.mx>. Consulta: 27/Junio/2017.

IMTA-INIFAP. (2010). Informe final del proyecto “Evaluación del cambio climático en la productividad de la agricultura de riego y temporal del estado de Sinaloa”. Reporte Técnico del Proyecto. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)-Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). 15-35 pp.

Jefferies, R.A. & Lawson, H. M. (1991). A key for the stages of development of potato (*Solanum tuberosum*). *Annals of Applied of Biology*. 119 (2): 387-389.

Luque, S. E.J. (2011). Ficha técnica. Fundación produce Sinaloa A.C. CVTTS. Pp. 15.

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, B.W., Sifuentes, I.E., Slack, D.C., & 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.

Onamu, R., Legaria, S. J. P., Castellanos, S. J., Rodríguez, -de-la-O J. L., & Pérez, N. J. (2015). Diversidad genética entre variedades de papa (*solanum tuberosum* l.) cultivadas en México. Artículo científico. *Revista Fitotecnia Mexicana*. Vol. 38. Chapingo, Texcoco, Estado de México. pp. 9.

SIAP. (2012). Atlas agropecuario y pesquero: información del sector agroalimentario 2012. Sistema de información agroalimentaria y pesquera. SAGARPA. México. 154 p

Sifuentes I, E. y Macías C, J. (2015). Programación Integral y Gestión del Riego a Través de Internet. INIFAP-CIRNO. Campo Experimental Valle del Fuerte. Manual de Usuario v. 2.0. Folleto Técnico No. 42. ISBN: 978-607-0547-9. Juan José Ríos, Guasave, Sinaloa. 39 pp.