

Aplicación de Días grado de crecimiento en el cultivo de Papa (*Solanum tuberosum* L.) para estimar el abatimiento del agua en el suelo

Degree-days in a potato (*Solanum tuberosum* L.) crop to estimate the soil water depletion

Juan Manuel Covarrubias-Ramírez¹, Alejandro Zermeño-González², Víctor Manuel Parga-Torres¹,
Gregorio Briones-Sánchez², Enrique Troyo-Diéguez^{3*}

¹Campo Experimental Saltillo – Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).

²Departamento de Riego y Drenaje, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAN).

³Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. Calle Instituto Politécnico Nacional 195, Col. Playa Palo de Santa Rita, La Paz, B.C.S. México C.P. 23096. Correo electrónico: etroyo04@cibnor.mx.

*Autor de correspondencia

Resumen

El objetivo de este estudio fue obtener un modelo para la estimación del factor de abatimiento del agua en el suelo en función de los días grado (*Di*) de crecimiento en el cultivo de papa y el déficit hídrico durante el desarrollo del cultivo. La tasa de abatimiento del agua en el suelo se midió con tensiómetros y la profundidad de crecimiento del sistema radical (*Pr*) se estimó durante el ciclo de crecimiento del cultivo. Con datos agroclimáticos de estaciones climatológicas cercanas se determinaron los *Di* de crecimiento del cultivo. El factor de abatimiento del agua en el suelo (*f*) se obtuvo con mediciones del contenido de humedad del suelo (θ), en relación con los parámetros de capacidad de campo y punto de marchitez permanente. La relación entre la profundidad del sistema radical y los *Di* de crecimiento se describió mediante una ecuación no lineal tipo curvilínea ($r^2 = 0.9786$). Para la relación entre el factor de abatimiento y los *Di* de crecimiento se utilizó un polinomio de tercer orden ($r^2 = 0.820$). Al aplicar dicho modelo, el máximo valor de factor de abatimiento fue 0.352 para 11 grados *Di*, observándose una tendencia decreciente para el citado factor hasta una magnitud de 1 000 *Di*, alcanzando un valor de 0.292, que tiende a mantenerse estable para valores mayores de 1100 *Di*. La estimación de *Di* de crecimiento para el cultivo de papa es de utilidad para determinar oportunamente y la profundidad de su raíz.

Palabras clave: Cultivo de tuberosas; tiempo térmico; raíz; absorción de agua; abatimiento de humedad.

Abstract

The objective of the study was to obtain a model to estimate the depletion factor of soil water and crop water deficit from growing degree days (*Di*) in potatoes. The extraction pattern of soil water was measured with tensiometers, and the root depth (*Pr*) was estimated during the development cycle. The *Di* were determined with agro-climatic data from nearby weather stations. The depletion factor of soil water (*f*) is related to the current volumetric water content in the soil (θ), at field capacity and permanent wilting point. The relationship between *Pr* vs. *Di* was described by means of a non-linear model ($r^2 = 0.9786$). A polynomial of third order ($r^2 = 0.82$) was used for the relationship between the humidity depletion factor and growing *Di*. Based on this model, the maximum depletion factor was 0.352 for 11 *Di*, indicating a decreasing trend depletion factor to 1 000 *Di*, reaching a value of 0.292 for depletion factor, which remains roughly stable for values over 1 100 *Di*. The estimation of *Di* for the potato crop allows timely determination of the soil humidity depletion factor at the root depth.

Keywords: Tuberous crops; thermic period; root; water absorption; moisture depletion.

Recibido: 26 de julio de 2017

Aceptado: 26 de septiembre de 2018

Publicado: 15 de agosto de 2019

Como citar: Covarrubias-Ramírez J. M., Zermeño-González, A., Parga-Torres, V. M., Briones-Sánchez, G., & Troyo-Diéguez, E. (2019). Aplicación de Días grado de crecimiento en el cultivo de Papa (*Solanum tuberosum* L.) para estimar el abatimiento del agua en el suelo. *Acta Universitaria* 29, e2033. doi: <http://doi.org/10.15174/au.2019.2033>

Introducción

En los sistemas de producción agrícola sostenibles, donde se aplica un manejo consistente y uniforme de los cultivos y agua de riego, es posible establecer una relación precisa entre el factor de abatimiento del agua en el suelo (f), considerado como un indicador del déficit hídrico, y los días grado (Di) de crecimiento. De esta forma, es posible determinar el grado de estrés hídrico del cultivo en función de los Di de crecimiento, con la finalidad de establecer los calendarios de riego.

El déficit de agua en el suelo es un indicador del grado de estrés hídrico de un determinado cultivo, que puede permitirse hasta el momento en que empiecen a detectarse efectos en el desarrollo y rendimiento del mismo (Pavlista, 2015), y es relevante porque manifiesta un efecto diferente en cada etapa de crecimiento. Cabe recalcar que cada especie tiene una determinada etapa crítica vulnerable al déficit hídrico, lo cual es de suma importancia en el cultivo de papa, toda vez que puede reflejarse en una reducción significativa del rendimiento. El déficit de agua en el suelo se describe mediante el coeficiente de disponibilidad de agua en el suelo (K_s) y el coeficiente de deflexión del agua en el suelo (Barra, Correa, Salazar & Sagredo, 2013). K_s se calcula mediante la siguiente expresión (Servín-Palestina, Tijerina-Chávez, Medina-García, Palacios-Velez & Flores-Magdaleno, 2017):

$$K_s = \frac{1}{1 + \frac{Ev}{S*(1-HAR/HAT)}} \quad (1)$$

donde Ev es la evaporación de tanque tipo A (mm); S es el factor que relaciona las características hidrodinámicas del suelo y que depende de la textura, el cual adopta un valor de 10 para suelos arenosos, 30 para suelos francos y 60 para suelos arcillosos; HAR es la humedad aprovechable residual del suelo (diferencia entre el contenido de humedad actual y el que corresponde al punto de marchitamiento permanente [PMP]); y HAT es la humedad aprovechable total del suelo (diferencia entre el contenido de humedad a capacidad de campo [CC] y el de PMP). El valor de K_s es 1 cuando la humedad aprovechable residual es 100% y decrece exponencialmente a medida que la HAR disminuye. Cuando la tasa de evapotranspiración es baja y el suelo es capaz de abastecer el agua que requiere la planta por la demanda evapotranspirativa de la atmósfera, el valor de K_s es cercano a la unidad (Allen, Pereira, Raes & Smith, 1998; Servín-Palestina *et al.*, 2017). Para mantener el valor de K_s cercano a 1 en suelos arenosos, los riegos deben ser muy frecuentes, debido a la baja capacidad de retención de agua de dichos suelos, mientras que en suelos arcillosos la frecuencia de riegos es menor (Cambouris, Zebarth, Ziadi & Perron, 2014; Naglic, Kechavarzi, Coulon & Pintar, 2014). El coeficiente de deflexión del agua en el suelo (K_r) (Allen *et al.*, 1998) se define como:

$$K_r = \frac{TEW - D_{ei}}{TEW - REW} \quad (2)$$

donde TEW es el agua que se evapora de la superficie del suelo después de aplicar el riego (mm), D_{ei} es la lámina de agua evaporada al día i (mm) y REW es la lámina de agua fácilmente evaporada (mm). TEW se obtiene mediante la siguiente ecuación (Allen *et al.*, 1998):

$$TEW = 1000 (\theta_{cc} - 0.5 \theta_{pmp}) Z \quad (3)$$

donde: θ_{cc} es el contenido de agua en el suelo a CC (cm^3/cm^3), θ_{pmp} es el contenido de agua en el suelo a PMP (cm^3/cm^3), y Z es la profundidad del suelo sujeta a evaporación (mm).

El coeficiente K_r adquiere valores de 0 a 1 y su comportamiento es lineal e inversamente proporcional a D_{ei} . Cabe aclarar que el concepto de disponibilidad y deflexión de agua en el suelo no expresa el abatimiento del agua en el suelo ni la relación que tiene este en el desarrollo del cultivo, sino que son indicadores de la respuesta del suelo a una condición hídrica (Dabach, Lazarovitch, Simunek & Shani, 2013).

Programas de riego en el cultivo de papa con abatimientos de agua en el suelo a 60 kPa constantes durante el desarrollo se asocian a una eficiencia en el uso del agua (EUA) de $1.4 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ en rendimiento total y $0.9 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ en rendimiento comercial; a su vez, programas con 50% de humedad aprovechable reflejan una EUA de $0.75 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ a $1.39 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ (Shock, 2007).

Al iniciar la emergencia del cultivo para favorecer dicho proceso, los brotes producen raíces que rápidamente se hidratan, a la vez que exploran mayor espacio para tener la oportunidad de absorber agua y nutrientes. El abatimiento que es factible permitir se estima que oscila de 30 kPa a 50 kPa, lo cual se logra con un riego de germinación después de la siembra, aunque posteriormente la tensión hídrica se incrementa hasta 80 kPa (Lavy, Coleman & Veilleux, 2013). En el periodo de tuberización se debe aumentar el contenido de agua en el suelo para disminuir la tensión hídrica hasta 40 kPa, ello con la finalidad de favorecer la estolonización a mayor profundidad de suelo (Reyes-Cabrera, Zotarelli, Rowland, Dukes & Sargent, 2014).

El inicio de tuberización es la etapa más sensible al suministro de agua, por lo que solo admite el menor abatimiento, toda vez que se incrementa el número de tubérculos por planta, por lo que para incrementar el tamaño del tubérculo debe mantenerse un nivel elevado de agua en el suelo (Stark *et al.*, 2013). El llenado del tubérculo es la etapa de mayor demanda de agua, por lo cual el contenido de agua en el suelo debe ser de 80% de humedad aprovechable, lo que representa una tensión hídrica de 30 kPa a 50 kPa. En este sentido, la variación es característica del genotipo, la cual puede interactuar con otros factores de la producción, incluyendo las condiciones de sanidad vegetal (Haverkort, Franke, Engelbrecht & Steyn, 2013). El contenido de agua en el suelo debe mantenerse constante en esta etapa para evitar que el rendimiento del cultivo se vea afectado, toda vez que las variaciones de humedad inducen crecimiento de nuevos tubérculos pequeños, los cuales se conocen como segundos crecimientos (Stark *et al.*, 2013).

La estimación de los D_i de crecimiento, concepto también conocido como tiempo térmico (TT) (Sau, López-Cedrón, Confalones & Lizaso, 2010), es un factor determinante en la interacción suelo-clima-planta, el cual se relaciona con las etapas de desarrollo de los cultivos, de suma utilidad para realizar estimaciones en función del desarrollo del cultivo y la profundidad de raíces (Eshel & Beeckman, 2002). Existen varios métodos para estimar los D_i de crecimiento utilizando datos actuales de las estaciones agroclimáticas de registro continuo, aunque el método más efectivo para el cultivo de papa es el método gradual (Flores-Gallardo, Ojeda-Bustamante, Flores-Magdaleno, Sifuentes-Ibarra & Mejía-Sáenz, 2012).

Los estados de Nuevo León y Coahuila en el norte de México, además de Sonora y Sinaloa en el noroeste, aportan alrededor del 50% de la producción nacional de papa; los primeros citados, así como Sonora y Jalisco, sobresalen porque sus rendimientos son superiores a 30 Mg ha^{-1} , debido al uso de sistemas tecnificados de producción, en comparación con otros estados (García-Aparicio, 2013).

El presente estudio partió de la hipótesis de que el desempeño fenológico de cultivares de papa que describe el proceso de absorción de agua define su capacidad adaptativa a la tendencia de los D_i como indicador de presión de los factores agroclimáticos en la región oriental de Coahuila y occidental de Nuevo León. Por lo anterior, el objetivo fue obtener un modelo para la estimación del f en función de los D_i de

crecimiento en el cultivo de papa y el déficit hídrico durante el desarrollo del cultivo, para la zona de producción de papa de los estados de Coahuila y Nuevo León.

Materiales y Métodos

Se estudiaron cuatro variedades de papa en cuatro localidades de Coahuila y una localidad en Nuevo León, México (tabla 1).

Tabla 1. Localidades y variedades de papa en la región de Coahuila (Coah.) y Nuevo León (N. L.), México.

Localidad	Latitud Norte	Longitud Oeste	Altitud (msnm)	Variedad	Ciclo	
					Tipo	Período*
Emiliano Zapata, Coah.	25°16'02"	100°46'27"	2040	Atlantic	Precoz	106
Jame, Coah.	25°22'10"	100°38'11"	2534	Alpha	Intermedia	138
Los Lirios, Coah.	25°22'10"	100°36'44"	2421	Gigant	Precoz	105
El Tunal, Coah.	25°24'12"	100°37'23"	2457	Gigant	Precoz	100
El Cristal, N.L.	24°50'11"	100°20'48"	1883	Herta	Tardía	138

*Días de siembra a desvare
Fuente: Elaboración propia.

Durante la primera parte del estudio se realizó la estimación de Di; el cálculo se inició con la temperatura óptima para cada etapa del cultivo, factor climático de suma relevancia que se relaciona con las etapas de desarrollo del cultivo (tabla 2).

Tabla 2. Requerimientos de temperatura del aire en el cultivo de papa a través de su crecimiento.

Etapa	Temperatura °C	
	Rango	Óptima
Siembra a Emergencia	7 - 30	17 - 19
Emergencia a Desarrollo Vegetativo	6 - 32	24 - 26
Desarrollo Vegetativo a Estolonización	12 - 19	12 - 15
Estolonización a Tuberización	10 - 20	15 - 18

Fuente: Intagri (2017); adaptado de Rubio *et al.* (2000) y Parga-Torres *et al.* (2005).

Para estimar los Di se utilizó el método gradual, el cual consiste en la aplicación de las ecuaciones:

$$Di = Tx - K_1 \text{ si } Tx < K_2 \quad (4)$$

$$Di = K_2 - K_1 \text{ si } Tx \geq K_2 \quad (5)$$

$$Di = 0 \text{ si } Tx \leq K_1 \quad (6)$$

donde:

D_i = Grados-día de crecimiento, T_x = Temperatura media ($^{\circ}\text{C}$), K_1 = Temperatura límite inferior de crecimiento ($^{\circ}\text{C}$), K_2 = Temperatura límite superior de crecimiento ($^{\circ}\text{C}$).

El crecimiento vertical de la raíz del cultivo se estimó midiendo el patrón de extracción de agua del suelo desde siembra hasta desvare, en número de días después de siembra (DDS), para lo cual se determinó el contenido de humedad en el suelo cada cinco días a 15 cm, 30 cm y 60 cm de profundidad, utilizando tensiómetros con diámetro del bulbo de observación de 10 cm para estimar la extracción de agua como absorción de la misma durante el desarrollo de raíces en cada localidad (Byrd *et al.*, 2015). La profundidad de crecimiento de la raíz se determinó cada cinco días. Con la información de DDS se estimaron los D_i , incluyendo los datos de temperatura de cuatro estaciones agroclimáticas en las localidades de estudio, tres en el estado de Coahuila (La Rosita, Emiliano Zapata, Roncesvalles) y una en el estado de Nuevo León (Cerro de Agua), las cuales operan en tiempo real; dichas estaciones forman parte de la Red Nacional de Estaciones Automatizadas (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias [INIFAP], 2017). Una vez reunida la información descrita, se aplicó el modelo de profundidad de raíz (Pr) en mm en función de los D_i acumulados (Pérez, 2000).

Las parcelas en estudio se consideraron dentro del esquema de agricultura tecnificada con sistemas de riego de alta frecuencia, donde el agua que se evapora de la superficie del suelo después de aplicar el riego se estima mediante el modelo TEW de Allen *et al.* (1998), el cual fue modificado, en virtud de que el cultivo de papa no tolera un abatimiento del agua en el suelo superior al 50% por su efecto en la reducción del rendimiento; además, el sensor está sujeto a un límite de lectura hasta de 70 kPa, la cual puede verse afectada por la altura de las localidades en estudio.

Según lo anterior, la ecuación (3) (Allen *et al.*, 1998) se modificó mediante la siguiente expresión:

$$TEW = (\theta_{cc} - \theta_i) * Z * 100 \quad (7)$$

donde θ_i es el contenido volumétrico de agua en el suelo a la máxima deflexión, según la etapa de desarrollo del cultivo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). De esta forma, θ_i debe ser menor al inicio del desarrollo vegetativo para forzar un mayor crecimiento de la raíz, aunque, en las etapas críticas para el rendimiento del cultivo, el θ_i debe ser mayor. El valor de θ_i se determinó como contenido gravimétrico de agua en el suelo (pw) por la densidad bruta del suelo (Db) y el contenido gravimétrico mediante la curva de tensión del suelo (T) en cada una de las cinco localidades (tabla 3).

Tabla 3. Modelo de tensión hídrica en el suelo para cuatro localidades en la región de Coahuila y una localidad en Nuevo León, México.

Localidad	Modelo	R^2 significación	Db, Mg ha^{-1}
Emiliano Zapata	$pw = 35.834 - 6.7409\text{LnT}$	0.99**	1.22
Jame	$pw = 31.67 - 6.1023\text{LnT}$	0.99**	1.32
Los Lirios	$pw = 27.807 - 4.705\text{LnT}$	0.98**	1.37
El Tunal	$Pw = 16.695 - 3.935\text{LnT}$		1.30
El Cristal	$Pw = 37.954 - 8.389\text{LnT}$	0.98**	1.30

Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de deflexión del agua en el suelo (2) descrito por Allen *et al.* (1998) se modificó por el f, a través de la ecuación:

$$f = 1 - \left[\frac{(\theta_{cc} - \theta_i)}{(\theta_{cc} - \theta_{pm})} \right] \quad (8)$$

El valor de f se estimó a partir del contenido volumétrico de agua en el día (θ_i) durante el desarrollo en DDS para el intervalo $\theta_{cc} - \theta_i$, donde el riego o la precipitación afectan el valor θ_i ; bajo tal condición, y ante la variación de la humedad, el intervalo puede disminuir, lo que conlleva un riego de deficiencia característico en el manejo de un cultivo sensible al déficit hídrico como el cultivo de papa. Una vez realizadas las estimaciones descritas, se correlacionó el valor de f en función de Pr y f en función de Di acumulados para proceder en consecuencia a la generación de los modelos numéricos.

Las variables de estudio se analizaron con el paquete estadístico SAS versión 9.3, mediante los procedimientos REG, CORR y NLIN.

Resultados y Discusión

La papa se siembra a una profundidad de 150 mm y el diámetro ecuatorial del tubérculo semilla es de 55 mm en promedio, el modelo inicia con la estimación del desarrollo a 230 mm de profundidad, considerando que el tubérculo ya muestra brotes (figura 1). El modelo de Pr es altamente significativo, el cual es un modelo no lineal (NLIN) que representa adecuadamente el comportamiento de la raíz en función a la variación climática, característica de los modelos curvilíneos (Servín-Palestina *et al.*, 2017). Dicho modelo cambia según se observa la acumulación de Di y representa de una forma fidedigna el crecimiento de raíz, el cual no es uniforme durante el desarrollo del cultivo. El modelo permite regar hasta la Pr y evitar percolación, con lo que se logra mayor eficiencia en el uso del agua, toda vez que se reduce la lámina total de riego que se aplica.

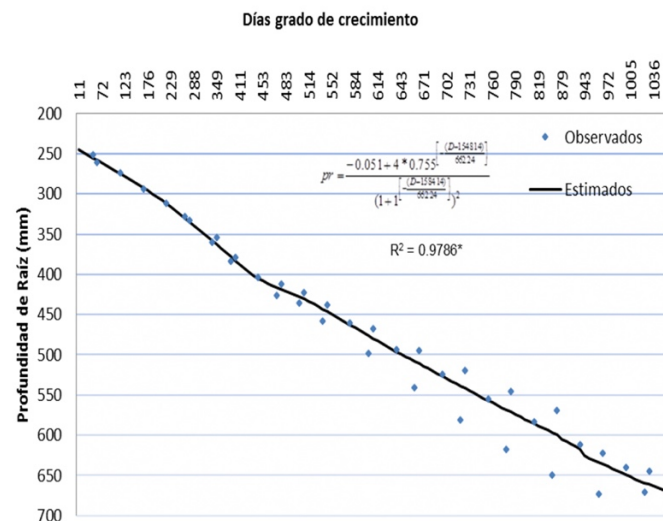


Figura 1. Desarrollo de raíz de papa estimado mediante el cálculo de Di de crecimiento aplicado a un modelo de Pr (Pérez, 2000).
Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente f adquiere valores de 0 a 1 (figura 2), su comportamiento es cúbico y directamente proporcional a θ_i , por lo que, al reducirse el contenido de agua en el suelo, el f disminuye gradualmente. Al respecto, es notorio que el cultivo de papa requiere mayor abatimiento después de emergencia para que la

raíz explore a mayor profundidad buscando el agua (Dabach *et al.*, 2013; Lavy *et al.*, 2013); además, existe la relación que sugiere que a mayor f el intervalo de riego será menor, en tanto que, si es menor, se recomienda incrementar la frecuencia de riego, con la finalidad de evitar déficit hídrico en el cultivo (Villalobos-Reyes, Castellanos-Ramos, Tijerina-Chávez & Crespo-Pivhardo, 2005).

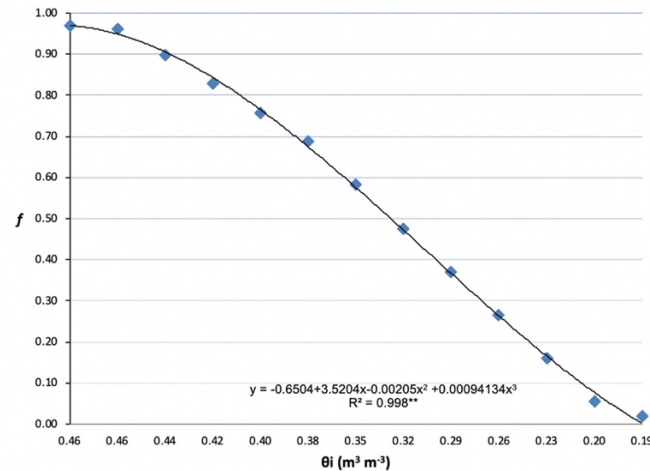


Figura 2. Abatimiento del agua en el suelo en función al contenido volumétrico.
Fuente: Elaboración propia.

Para demostrar que θ_i fluctúa a través del crecimiento del cultivo, a la vez que su valor es función del aporte hídrico, el cual es proporcionado por el riego y la precipitación observada durante el ciclo de cultivo, es necesario considerar que el riego es parte de un programa y que puede ser manipulado, y tomar en cuenta que la precipitación es parte del clima; en consecuencia, los D_i son parte del clima que afecta el desarrollo del cultivo (figura 1). Aún cuando la agro-climatología considera que no hay relación entre la temperatura y la precipitación, en este estudio demostramos que la precipitación y la temperatura afectan los D_i , los cuales afectan el valor de θ_i . A partir de tal supuesto, con el despliegue numérico plasmado en la figura 2, y considerando la diversidad genética del cultivo de papa, el cual es poliploide (Bamberg & Del Rio, 2007), puede obtenerse el valor de f con los valores de θ_i durante el ciclo de cultivo para determinar condiciones de frontera superiores e inferiores. En este caso, las condiciones de frontera fueron $\theta_{cc}-\theta_{pmp}$, que corresponde a valores de f en el intervalo 0 a 1 (figura 3). Las funciones hidráulicas del suelo para realizar simulaciones son usadas comúnmente para analizar condiciones de frontera como el modelo propuesto (Yang, Zhang, Zhang & Lei, 2015).

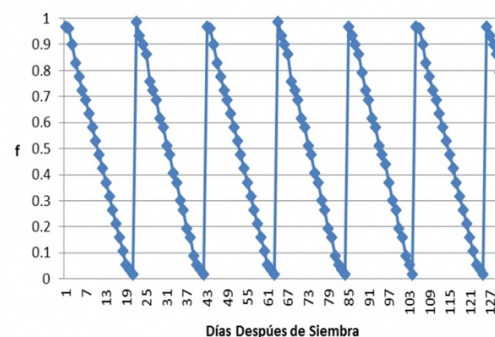


Figura 3. Simulación del abatimiento del agua en el suelo en función de los días de crecimiento.
Fuente: Elaboración propia.

Por su parte, la relación de los valores de f en función de Di se muestra en la figura 4, donde se observa una curva tipo polinómica.

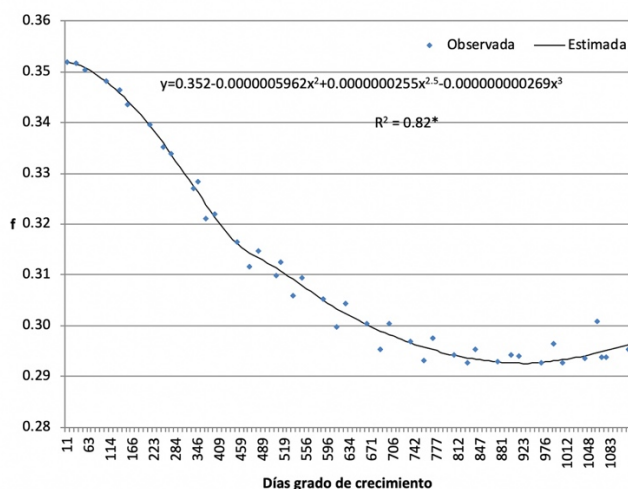


Figura 4. Abatimiento del agua (f) en el suelo en función de los Di de crecimiento.

Fuente: Elaboración propia.

El modelo de f vs. Di fue significativo ($r^2 = 0.82$) y refleja una respuesta curvilínea donde al aumentar Di disminuye f , lo que sugiere la necesidad de realizar riegos más frecuentes para promover el crecimiento del cultivo (figura 4). El modelo no presenta una curva constante, toda vez que los modelos curvilíneos representan la respuesta del cultivo como ser vivo, que es afectado por el clima, como ya lo describió Servín-Palestina *et al.* (2017). El valor de f se encuentra dentro del intervalo de 0.29 a 0.36 para el cultivo de papa, el cual es un cultivo muy sensible al déficit hídrico severo en el suelo (Qin, Li, Wang, Zhang & Pu, 2013); lo anterior se debe a que los valores de f en la figura 3 representan los tipos de suelo (tabla 3), implícito en la relación numérica dentro del intervalo 0 a 1. Al respecto, si en la figura 1 el crecimiento de raíz no inicia en cero, el valor de abatimiento también debe iniciar con un valor mayor que cero como una respuesta biológica esperable, porque con el valor inicial de 0.3519 se relaciona con una etapa de déficit donde se promueve el desarrollo de la raíz. En este sentido, los valores finales alrededor de 0.29 se relacionan con un contenido de agua adecuado para el desarrollo del tubérculo y el rendimiento del cultivo (Deguchi, Iwama, Matsumoto & Tanigawa, 2015).

Los coeficientes de regresión obtenidos del modelo de datos experimentales dependen de los Di de crecimiento del cultivo, que resultan del crecimiento de brotes, extensión de hojas, Pr y respiración; a su vez, los valores de f son afectados por el crecimiento de hojas y la producción de materia seca del tubérculo. El modelo obtenido con los valores observados y con otros obtenidos por diversos autores (Haverkort *et al.*, 2013; Shock, 2007; Stark *et al.*, 2013) constituye una innovación tecnológica obtenida en campo para programar el riego de manera eficiente y oportuna, que puede complementar o, en caso necesario, substituir otros modelos publicados que se utilizan para programar riegos con información agroclimática (Flores-Gallardo *et al.*, 2013).

Para demostrar la utilidad de los coeficientes de crecimiento Di en el modelo propuesto que considera como variable focal el abatimiento de humedad, la correlación Pr vs. f es altamente significativa ($r = -0.998^{**}$), donde ambas variables dependen de los Di , por lo que son afectadas por el clima; en este caso, al aumentar Pr , el valor de f decrece en forma proporcional (figura 4).

El mayor crecimiento de raíz se detectó durante el desarrollo del tubérculo (figura 1), que es la etapa crítica donde el cultivo debe evitar déficit hídrico para un valor estimado de 1000 Di; en consecuencia, el valor de $f = 0.292$ (figura 4) es el de menor magnitud del ciclo (Dabach *et al.*, 2013; Deguchi *et al.*, 2015). El valor de f aumenta a 0.297 hacia el final para 1100 Di, en madurez fisiológica, lo que sugiere una respuesta para reducir el contenido de agua en el suelo, con la finalidad de que el tubérculo inicie la tuberización de la epidermis y se asegure su cosecha.

Conclusiones

Los coeficientes de crecimiento Di explican los niveles de abatimiento permisibles de agua en el suelo para el cultivo de papa; al respecto, se corroboró que los modelos curvilíneos son precisos durante el desarrollo del cultivo. La estimación del crecimiento de raíz en el cultivo de papa estimado en función de los Di de crecimiento es confiable y es un indicador de suma utilidad para la programación del riego, en virtud de que facilita la estimación oportuna de la lámina de riego a partir de la profundidad de la raíz. El cultivo de papa es un cultivo sensible al déficit hídrico, por lo que la precisión del manejo del agua de riego utilizando la información de los Di de crecimiento es fundamental para evitar estrés hídrico en el desarrollo.

Referencias

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper* (56), 1-15.
- Bamberg, J. B., & Del Río, A. H. (2007). The canon of potato science: Genetic diversity and gene banks. *Potato Research*, 50(3-4), 207-210. doi: <https://doi.org/10.1007/s11540-008-9035-z>
- Barra, M., Correa, J., Salazar, E., & Sagredo, B. (2013). Response of potato (*Solanum tuberosum* L.) germplasm to water stress under in vitro conditions. *American Journal of Potato Research*, 90(6), 591-606. doi: <https://doi.org/10.1007/s12230-013-9333-0>
- Byrd, S. A., Rowland, D. L., Bennett, J., Zotarelli, L., Wright, D., Alva, A., & Nordgaard, J. (2015). The relationship between sap flow and commercial soil water sensor readings in irrigated potato (*Solanum tuberosum* L.) production. *American Journal of Potato Research*, 92(5), 582-592. doi: <https://doi.org/10.1007/s12230-015-9471-7>
- Cambouris, A. N., Zebarth, B. J., Ziadi, N., & Perron, I. (2014). Precision agriculture in potato production. *Potato Research*, 57(3-4), 249-262. doi: <https://doi.org/10.1007/s11540-014-9266-0>
- Dabach, S., Lazarovitch, N., Simunek, J., & Shani, U. (2013). Numerical investigation of irrigation scheduling based on soil water status. *Irrigation Science*, 31(1), 27-36. doi: <https://doi.org/10.1007/s00271-011-0289-x>
- Deguchi, T., Iwama, K., Matsumoto, M., & Tanigawa, J. (2015). Effect of varietal difference in root system on hydraulic conductance in potatoes under different soil water conditions and planting dates. *Potato Research* 58(2), 103-119. doi: <https://doi.org/10.1007/s11540-015-9289-1>
- Flores-Gallardo, H., Ojeda-Bustamante, W., Flores-Magdaleno, H., Mejía-Sáenz, E., & Sifuentes-Ibarra, E. (2012). Grados día y la programación integral del riego en el cultivo de papa. *Terra Latinoamericana* 30(1), 59-67.
- Flores-Gallardo, H., Ojeda-Bustamante, W., Flores-Magdaleno, H., Sifuentes-Ibarra, E., & Mejía-Sáenz, E. (2013). Simulación del rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) en el norte de Sinaloa usando el modelo AQUACROP. *Agrociencia*, 47(4), 347-359.
- García-Aparicio, I. (2013). *Análisis comparativo de productividad y sustentabilidad de dos variedades de papa en la sierra de Arteaga, Coahuila* (Tesis profesional). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coahuila
- Haverkort, A. J., Franke, A. C., Engelbrecht, F. A., & Steyn, J. M. (2013). Climate change and potato production in contrasting South African agro-ecosystems 1. Effects on land and water use efficiencies. *Potato Research* 56(1), 31-50. doi: <https://doi.org/10.1007/s11540-013-9230-4>

- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). (2017). *Red Nacional de Estaciones Automatizadas INIFAP*. Laboratorio Nacional de Modelaje y Sensores Remotos. Recuperado el 23 de febrero del 2017 de <https://clima.inifap.gob.mx/lnmysr>
- Intagri. (2017). *Requerimientos de Clima y Suelo para el Cultivo de la Papa*. Serie Hortalizas. Núm. 10. Artículos Técnicos de Intagri. México. 3 p. <https://www.intagri.com/articulos/hortalizas/requerimientos-de-clima-y-suelo-para-el-cultivo-de-la-papa>
- Lavy, D., Coleman, W. K., & Veilleux, R. E. (2013). Adaptation of potato to water shortage: Irrigation management and enhancement of tolerance to drought and salinity. *American Journal of Potato Research* 90(2), 186-206. doi: <https://doi.org/10.1007/s12230-012-9291-y>
- Eshel, A., & Beeckman, T. (Eds.) (2002). *Plant roots: The hidden half*. Editors (4th Ed.). CRC Press. Boca Raton, Florida. USA. doi: <https://doi.org/10.1201/b14550>
- Naglic, B., Kechavarzi, C., Coulon, F., & Pintar, M. (2014). Numerical investigation of the influence of texture, surface drip emitter discharge rate and initial soil moisture condition on wetting pattern size. *Irrigation Science* 32(6) 421-436. doi: <https://doi.org/10.1007/s00271-014-0439-z>
- Parga-Torres, V. M., Zamora-Villa, V. M., González-Vázquez, V. M., García-Garza, S. J., & Villavicencio-Gutiérrez, E. E. (2005). Interacción genotipo por ambiente en clones de papa bajo riego en el noreste de México. *Agricultura Técnica en México* 31(1), 55-64.
- Pavlista, A. D. (2015). Scheduling reduced irrigation on 'Atlantic' potato for minimal effect. *American Journal of Potato Research*, 92(6), 673-683. <https://doi.org/10.1007/s12230-015-9483-3>
- Pérez-Sato, F. (2000). *Generación de un programa de riego para el cultivo de la papa en la región de Arteaga, Coahuila* (Tesis de Maestría). Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro". Buenavista, Saltillo, Coahuila.
- Qin, S., Li, L., Wang, D., Zhang, J., & Pu, Y. (2013). Effects of limited supplemental irrigation with catchment rainfall on rain-fed potato in semi-arid areas on the Western Loess Plateau, China. *American Journal of Potato Research* 90(1), 33-42. doi: <https://doi.org/10.1007/s12230-012-9267-y>
- Reyes-Cabrera, J., Zotarelli, L., Rowland, D. L., Dukes, M. D., & Sargent, S. A. (2014). Drip as alternative irrigation method for potato in Florida sandy soils. *American Journal of Potato Research* 91(5), 504-516. doi: <https://doi.org/10.1007/s12230-014-9381-0>
- Rubio C., O. A., Rangel, G. J. A., Flores, L. R., Magallanes, G. J. V., Díaz, H. C., Zavala, Q. T. E., Rivera, P. A., Cadena, H. M., Rocha, R. R., Ortiz, T. C., López, D. H., Díaz, V. M., Paredes, T. A. (2000). *Manual Para la Producción de Papa en las Sierras y Valles Altos del Centro de México*. Libro Técnico No. 1. División Agrícola. INIFAP. México. 38 p.
- Sau, F., López-Cedron, F. X., Confalones, A. E., & Lizaso, J. I. (2010). Modelos de simulación del cultivo de maíz: Fundamentos y aplicaciones en España. *Pastos* 40(2), 117-138.
- Servín-Palestina, M., Tijerina-Chávez, L., Medina-García, G., Palacios-Velez, O., & Flores-Magdaleno, H. (2017). Sistema para programar y calendarizar el riego de los cultivos en tiempo real. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 8(2), 423-430.
- Shock, C. C. (2007). The canon of potato science: 31. Irrigation. *Potato Research* 50(3-4) 331-333. doi: <https://doi.org/10.1007/s11540-008-9072-7>
- Stark, J. C., Love, S. L., King, B. A., Marshall, J. M., Bohl, W. H., & Salaiz, T. (2013). Potato cultivar response to seasonal drought patterns. *American Journal of Potato Research* 90(3), 207-216. doi: <https://doi.org/10.1007/s12230-012-9285-9>
- Villalobos-Reyes, S., Castellanos-Ramos, J. Z., Tijerina-Chávez, L., & Crespo-Pivhardo, G. (2005). Coeficientes de desarrollo del cultivo de brócoli con riego por goteo. *Terra Latinoamericana* 23(3), 329-333.
- Yang, D., Zhang, T., Zhang, K., & Lei, S. (2015). Extending the integrated Richards equation method to new boundary conditions: model description and validation. *Agrociencia*, 49(7), 723-737.