



Quinto
Congreso Nacional
de Riego y Drenaje
COMEII-AURPAES 2019

Septiembre 2019 | Mazatlán, Sinaloa



Artículo: COMEII-19020

Mazatlán, Sin., del 18 al 20

de septiembre de 2019

SIMULACIÓN DEL CRECIMIENTO DE PAPA MEDIANTE EL USO DEL MODELO “SIMPLE” EN MOCHIS, SINALOA

José Alberto Jiménez Ayala^{1*}; Agustín Ruíz García²

¹Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco, km 38.5. Chapingo, Estado de México, C.P 56230. México

josealbertojairrigacion@gmail.com (*Autor de Correspondencia)

²Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco, km 38.5. Chapingo, Estado de México, C.P 56230. México

Resumen

Los modelos de simulación biológica forman parte del cambio o transformación de la agricultura de precisión, lamentablemente la mayoría de estos son muy complejos resultando imprácticos para su uso, una alternativa es el uso de modelos más sencillos como es el modelo SIMPLE, este puede simular varios cultivos y entre ellos la papa siendo un cultivo de gran importancia en la zona de Mochis, este trabajo se realizó con datos del Campo Experimental Valle del Fuerte (CEVAF), los cuales fueron obtenidos durante el ciclo agrícola (O-I) 2008-2009 en el distrito de riego 075 “Río Fuerte” (DR-075), en los módulos de riego Santa Rosa y Taxtes; la variedad de papa que se utilizó fue ‘Alpha’ comparando su crecimiento en biomasa con las variedades utilizadas en SIMPLE, para encontrar los parámetros a calibrar, RUE se ajustó con un enfoque en la radiación incidente del lugar ya que esta fue 3 veces menor que en los experimentos con los que se realizó el modelo SIMPLE. La calibración se realizó manualmente obteniendo un RRMSE de 11.08% para la biomasa acumulada simulada en el periodo de crecimiento, catalogándolo como un buen ajuste y proponiéndolo como un modelo útil para esta zona y cultivo.

Palabras claves: biomasa, eficiencia de uso de radiación.



Introducción

De acuerdo con FAO (2008) del incesante incremento de la población año con año más del 95% de este se dará en los países en desarrollo, donde ya se ejerce una intensa presión sobre la tierra y el agua, por lo tanto el gran desafío actual en la agricultura es satisfacer la demanda mundial recurriendo en especial a el cultivo de la papa por varias razones: es un alimento más nutritivo que se produce en menos tiempo, con menos tierra y en climas más difíciles que cualquier otro cultivo importante y hasta un 85% de la planta es comestible para las personas, en comparación con el 50% en el caso de los cereales. Por lo tanto la papa debería ser un importante elemento de las estrategias destinadas a la seguridad alimentaria. Las estadísticas de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), indican que a nivel mundial se sembraron aproximadamente 19.30 millones de hectáreas del cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.), con un volumen de producción cercano 388.2 millones de toneladas y un rendimiento promedio de 20.11 t ha⁻¹ en el año 2017 (FAOSTAT, 2019). En el año 2017 en México se produjeron 1 715 499 toneladas y en el estado de Sinaloa 332 101 toneladas siendo el 2do estado con mayor aporte a la producción nacional (SIAP, 2018). En la actualidad los modelos de simulación biológica se pueden definir como programas que describen mediante fórmulas matemáticas diferentes procesos, mecanismos e interacciones que ocurren dentro de un sistema biológico, y que permite representar conceptualmente una simplificación del sistema de producción (Ruíz, 2014).

Existen varios modelos de simulación biológica para papa que determinan los °D, las fases fenológicas y el rendimiento, como los modelos: DSSAT (Hoogenboom et al., 2012; Jones et al., 2003), LINTUL (Kooman PL and AJ Haverkort 1995), AquaCrop (Raes et al., 2009) y SIMPOTATO (Hodges et al., 1992). Los modelos mencionados anteriormente son muy complejos y muchas veces los hace inútiles en el uso práctico ya que si nosotros queremos explicar el comportamiento de un cultivo con pocos parámetros conocidos la simulación no se podrá llevar a cabo, o si se proponen valores incorrectos la simulación no será la adecuada. El tipo de modelos de crecimiento de cultivos a usar depende de la aplicación por ejemplo si queremos obtener la influencia de pocos factores en el rendimiento podemos enfocarnos en modelos más simples. SIMPLE es un modelo de cultivo genérico fácilmente modificable simulando para cualquier cultivo el crecimiento, desarrollo y rendimiento, este incluye 13 parámetros del tipo de cultivo a especificar, con cuatro de estos para características de la variedad y nueve de especie. Las entradas comúnmente disponibles que se requieren para el modelo incluyen diariamente datos del clima, manejo de cultivo y parámetros de retención de agua del suelo. El modelo esta calibrado para 14 cultivos diferentes de 25 experimentos de campo detallados, lo que resultó en un RRMSE de 25.4% para el rendimiento final; está disponible en varios marcos de simulación, incluida una versión independiente en R, Excel y como parte de DSSAT (Zhao et al., 2019). Los modelos de cultivos generalmente requieren datos meteorológicos diarios por lo que si se combinan con modelos de predicción del clima se convierten en una herramienta para mejorar el manejo de los recursos pronosticando el comportamiento del crecimiento (acumulación de biomasa), de acuerdo a esto el objetivo general es simular el crecimiento del cultivo de papa en condiciones de riego haciendo uso del modelo de simulación SIMPLE en Mochis, Sinaloa, para posteriores investigaciones en el pronóstico de rendimientos.



Materiales y Métodos

Descripción del área de estudio

La investigación se hizo con los datos experimentales del Campo Experimental Valle del Fuerte (CEVAF), los cuales fueron obtenidos durante un ciclo agrícola (O-I) 2008-2009 en el distrito de riego 075 “Río Fuerte” (DR-075), que se localiza en las coordenadas geográficas de 25° 48.89’ N, 109° 1.53’ O, a una altitud promedio de 20 msnm, en los módulos de riego Santa Rosa y Taxtes; la variedad de papa que se utilizó fue ‘Alpha’, empleando un sistema de riego por goteo; la fecha de siembra fue el 31 de octubre de 2008 y la de cosecha el 27 de febrero de 2009, se contó con 6 muestreos de materia seca distribuidos en todo el ciclo de cultivo.

Descripción del modelo SIMPLE

El modelo simple se basa en una simple ecuación que engloba la tasa de cambio de materia seca en la planta, esta ecuación está dividida en varios coeficientes siendo afectados por parámetros y por datos de entrada de clima. La situación de producción del modelo de acuerdo con Rabbinge, (1993) es alcanzable, esto quiere decir que el modelo además de considerar efectos de radiación y temperatura toma en cuenta el efecto debido a el agua disponible, sin considerar: efectos por contenido de nitrógeno, fósforo y efectos por la aparición de malezas, plagas y enfermedades. El modelo solo considera un parámetro de manejo denominado f_{solar_max} el cual toma en cuenta indirectamente el espaciamiento entre plantas (densidad de siembra), la orientación del sistema de plantación y otros parámetros de manejo no son considerados.

Entradas del modelo

Datos del clima: el modelo requiere datos de temperatura máxima y mínima ($^{\circ}C$), precipitación (mm), radiación solar o de onda corta (MJm^2dia^{-1}).

Datos del suelo: el balance de agua en el suelo hace uso del índice de referencia agrícola para sequía denominado ARID de acuerdo con Woli et al. (2012), los parámetros necesarios son: contenido volumétrico de agua a capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP), obteniendo la fracción de agua disponible para la planta (AWC), número de curva de acuerdo con la metodología del número de curva de NRCS-USDA (RCN) (1986), el coeficiente de drenaje profundo (DDC, depende del tipo de suelo) y la profundidad de las raíces (RDZ).

Datos de riego: láminas diarias de riego (mm) sumándose a la precipitación y con este nuevo dato hacer el balance de agua en el suelo.

Evapotranspiración de referencia: la tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, que ocurre sin restricciones de agua, se conoce como evapotranspiración del cultivo de referencia, y se denomina E_{To} , esta ecuación denominada Penman-Monteith modificada por FAO se puede encontrar en el manual 56 de la FAO. La evapotranspiración se puede obtener a nivel horario, diario y mensual, para este modelo los datos son diarios, requiriendo los siguientes datos: día Juliano, altitud (msnm), latitud y longitud ($^{\circ}$) y datos de clima: temperatura máxima y mínima ($^{\circ}C$), precipitación (mm), radiación solar o de onda corta (MJm^2dia^{-1}), humedad relativa media (%) y velocidad del viento (m/s).



La fecha de siembra afecta directamente la tasa de crecimiento debido a que las funciones del modelo están ligadas a las entradas de datos climáticos diarios, por ejemplo si se considerara una simulación donde no se tuvieran riegos, el contenido de agua disponible para la planta en el suelo dependería únicamente de la precipitación y esta a su vez dependería de la época del año.

Ecuaciones del modelo SIMPLE

Aquí se presentan las ecuaciones básicas con las que se obtiene la biomasa y el rendimiento de acuerdo con Zhao et al., (2019).

$$\text{Biomass}_{\text{rate}} = \text{Radiation} * f_{\text{Solar}} * 10 * \text{RUE} * f(\text{CO}_2) * f(\text{Temp}) * \min(f(\text{Heat}), f(\text{Water})) \quad (1)$$

$$\text{Biomass}_{\text{cum}_{i+1}} = \text{Biomass}_{\text{cum}_i} + \text{Biomass}_{\text{rate}} \quad (2)$$

$$\text{Yield} = \text{Biomass}_{\text{cum}_{\text{maturity}}} * \text{HI} \quad (3)$$

Donde:

$\text{Biomass}_{\text{rate}}$ es la tasa diaria de crecimiento de biomasa kg/ha.

f_{Solar} es la fracción de radiación interceptada por el dosel de un cultivo.

RUE es la eficiencia de uso de la radiación (o sea de la radiación interceptada cuanta se convierte en biomasa).

$f(\text{CO}_2) * f(\text{Temp}) * \min(f(\text{Heat}), f(\text{Water}))$ son el estrés e impacto que cada uno tiene sobre el incremento de biomasa.

Fenología

Para determinar el desarrollo fenológico se hace uso de la temperatura acumulada, o unidades calor, siendo calculada como:

$$\Delta \text{TT} = \begin{cases} T - T_{\text{base}}, & T > T_{\text{base}} \\ 0, & T \leq T_{\text{base}} \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{TT}_{i+1} = \text{TT}_i + \Delta \text{TT} \quad (5)$$

Donde:

TT_i es la temperatura media acumulada para el i-ésimo día.

ΔTT es la temperatura media que se agrega en un día.

T es la temperatura media diaria.

T_{base} es la temperatura base para el desarrollo fenológico y también para el crecimiento del cultivo.

Crecimiento

La función solar está basada en la ley de atenuación de la luz de Beer-Lambert y en la intercepción de la radiación, pero no en el índice del área foliar. La función solar para el crecimiento de la hoja y el periodo de la senescencia se calcula:

$$f_{\text{Solar}} = \begin{cases} \frac{f_{\text{Solar_max}}}{1+e^{-0.01(T-T-I_{50A})}}, & \text{período de crecimiento de la hoja} \\ \frac{f_{\text{Solar_max}}}{1+e^{-0.01(T-T-(T_{\text{sum}}-I_{50B})}}, & \text{período de senescencia de la hoja} \end{cases} \quad (6)$$

Donde:

I_{50A} es la temperatura acumulada requerida para el desarrollo del área foliar para interceptar el 50% de la radiación solar durante el cierre del dosel e I_{50B} la temperatura requerida para alcanzar el 50% de la radiación interceptada durante la senescencia del dosel.

$f_{\text{Solar_max}}$ es la máxima fracción de radiación interceptada que un cultivo puede alcanzar. Para la mayoría de los cultivos de alta densidad, este valor es considerado en 0.95.

Temperatura, calor, estrés por sequía e impacto del CO_2 .

El impacto de la temperatura sobre la tasa de crecimiento de biomasa se calcula como:

$$f(\text{Temp}) = \begin{cases} 0, & T < T_{\text{base}} \\ \frac{T-T_{\text{base}}}{T_{\text{opt}}-T_{\text{base}}}, & T_{\text{base}} \leq T < T_{\text{opt}} \\ 1, & T \geq T_{\text{opt}} \end{cases} \quad (7)$$

Donde T es la temperatura media, y T_{base} y T_{opt} es la temperatura base y óptima para el crecimiento de biomasa respectivamente para una especie de cultivo dada.

El impacto del estrés por temperatura sobre la tasa de crecimiento de biomasa está basado en APSIM-Nwheat y se calcula como:

$$f(\text{heat}) = \begin{cases} 1, & T_{\text{max}} \leq T_{\text{heat}} \\ 1 - \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{heat}}}{T_{\text{extreme}} - T_{\text{heat}}}, & T_{\text{heat}} \leq T_{\text{max}} < T_{\text{extreme}} \\ 0, & T_{\text{max}} \geq T_{\text{extreme}} \end{cases} \quad (8)$$

Donde:

T_{max} es la máxima temperatura diaria

T_{heat} es el umbral de temperatura cuando la tasa de crecimiento de biomasa comienza a ser reducida por el estrés de calor.

T_{extreme} es el umbral de temperatura extrema cuando la tasa de crecimiento de la biomasa alcanza a ser cero debido al estrés por calor.

La temperatura requerida para alcanzar el 50% de la radiación interceptada durante la senescencia del dosel (I_{50B}) es aumentada por el estrés por calor (es decir, la senescencia del dosel es más rápida).

$$I_{50B, i+1} = I_{50B, i} + I_{\text{max, heat}} * (1 - f(\text{heat})) \quad (9)$$

Aquí $I_{\text{max, heat}}$ es la máxima reducción diaria en I_{50B} debido al estrés por calor.



EL impacto del CO₂ en la tasa de crecimiento de biomasa.

$$f(\text{CO}_2) = \begin{cases} 1 + S_{\text{CO}_2} * (\text{CO}_2 - 350), & 350 \leq \text{CO}_2 < 700 \text{ ppm} \\ 1 + S_{\text{CO}_2} * 350, & \text{CO}_2 > 700 \text{ ppm} \end{cases} \quad (10)$$

Donde:

S_{CO₂} Es la sensibilidad específica del cultivo de RUE al CO₂ elevado (por ejemplo, S_{CO₂} es usualmente menor para cultivos C-4 que para cultivos C-3), y el CO₂ es la concentración de CO₂ atmosférica.

EL impacto del estrés por sequía sobre RUE y la radiación interceptada.

Se emplea el uso de un índice para hacer el balance de agua y para determinar el estrés por sequía sin requerir características detalladas del perfil del contenido de agua en el suelo.

$$f(\text{water}) = 1 - S_{\text{water}} * \text{ARID} \quad (11)$$

Donde:

ARID es un índice estandarizado que va de 0 (sin escasez de agua) a 1 (escasez de agua extrema y estrés asociado por sequía). ARID es calculado en base a la disponibilidad de agua y la evapotranspiración de referencia ET_o.

S_{water} es la sensibilidad de RUE al índice ARID.

$$\text{ARID} = 1 - \frac{\min(\text{ET}_o, 0.096 * \text{PAW})}{\text{ET}_o} \quad (12)$$

Aquí PAW es el contenido de agua disponible para la planta en el perfil de suelo para el enraizamiento profundo, mientras que 0.096 es una constante genérica del consumo de agua de la raíz diario, representando la máxima fracción de agua disponible extraída en un día; PAW es calculada de una función simple de balance de agua, incluyendo precipitación, riego, escorrentía superficial, drenaje profundo.

La función de estrés por sequía es similar a la usada por Sinclair et al. (1984) donde el estrés del cultivo comienza en <75% del agua disponible para la planta. El estrés por sequía reduce la RUE y acelera la disminución de la interceptación de radiación.

$$I_{50B, i+1} = I_{50B, i} + I_{\text{max, water}} * (1 - f(\text{water})) \quad (13)$$

Donde:

I_{max, water} es el incremento máximo diario en I_{50B} debido al estrés por sequía. Además, la radiación interceptada es afectada cuando el estrés por sequía se vuelve lo suficientemente severo, similar al modelo AquaCrop.

$$f_{\text{Solar, water}} = \begin{cases} 0.9 + f(\text{water}), & f(\text{water}) < 0.1 \\ 1, & f(\text{water}) \geq 0.1 \end{cases} \quad (14)$$

Parámetros del modelo

En el siguiente cuadro se muestran los parámetros del cultivo de papa, algunos de estos

Cuadro 1. Valores de los parámetros de especie y variedad usados en el modelo SIMPLE
(cuadro traducido de Zhao *et al.*, 2019).

Cultivo	Variedad	Parámetros de variedad				Parámetros de especie								
		Tsum	HI	I50A	I50B	Tbase	Topt	RUE	I50maxH	I50maxW	MaxT	Extremet	CO ₂ _{RUE}	S_Water
papa	Sebago	2300	0.82	500	350	4	22	1.3	50	30	34	45	0.1	0.4
papa	Desiree	2600	0.7	690	450	4	22	1.3	50	30	34	45	0.1	0.4
papa	Zibaihua	2500	0.45	690	500	4	22	1.3	50	30	34	45	0.1	0.4
papa	Jinguan	2400	0.45	690	450	4	22	1.3	50	30	34	45	0.1	0.4
papa	Russet Burbank	2200	0.85	500	400	4	22	1.3	50	30	34	45	0.1	0.4
papa	Hilite Russet	2200	0.85	480	450	4	22	1.3	50	30	34	45	0.1	0.4

Donde:

Tsum: Temperatura acumulada requerida desde la siembra hasta madurez (°C d).

HI: Índice de cosecha.

I50A: Temperatura requerida para desarrollar el área de la hoja para interceptar el 50% de la radiación (°C d).

I50B: Temperatura requerida para alcanzar el 50% de la radiación interceptada durante la senescencia del dosel (°C d).

Tbase: Temperatura base (°C).

Topt: Temperatura óptima (°C).

RUE: Eficiencia de uso de la radiación (gMJ⁻¹ m⁻²).

I50maxH: Máxima reducción diaria en I50B debido al estrés por calor (°C d).

I50maxW: Máxima reducción diaria en I50B debido al estrés por agua (°C d).

Tmax: Umbral de temperatura máxima para empezar a acelerar a senescencia (°C).

Text: Umbral de temperatura extrema cuando RUE se convierte en 0 (°C).

CO₂: Incremento relativo en RUE por ppm debido al incremento de CO₂ por encima de 350 ppm.

Swater: Sensibilidad de RUE debido al estrés por sequía (adimensional).

Parámetros a considerar son las temperaturas en las que se desarrollaron ya que se tienen diferentes valores reportados en la literatura, según Flores-Gallardo *et al.*, (2012) la papa se desarrolla en un intervalo de 2 a 29 °C y de acuerdo con Sands *et al.* (1979), el cultivo de papa tiene requerimientos térmicos específicos que han sido estudiados con precisión y han conducido al desarrollo de los P-days, este método considera una temperatura mínima de 7 °C para el desarrollo, una óptima (Topt) de 21 °C, y que el desarrollo se detiene a temperaturas mayores o extremas (Text) de 30 °C.

Se simuló el cultivo de papa usando los datos climáticos del experimento en Mochis y los parámetros propuestos en el artículo de Zhao *et al.*, (2019) para cada una de las variedades, comparando la cantidad de biomasa acumulada (kg/ha) con la obtenida para la variedad 'Alpha'. Los parámetros del suelo que se usaron se obtuvieron de información proporcionada y procesada AWC= 0.15; DDC=0.5; RCN=89 y RDZ=1200.

La calibración de los parámetros se realizó manualmente minimizando los estadísticos RMSE (raíz cuadrada del cuadrado medio del error) y RRMSE (raíz cuadrada relativa del

cuadrado medio del error) además de usar el Índice de concordancia de Willmott (d) de acuerdo con Willmott (1982) y Eficiencia propuesto por Nash y Sutcliffe (NSE).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2} \quad (15)$$

$$RRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}}{\sum_{i=1}^n O_i} * 100 \quad (16)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (17)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (18)$$

Resultados y Discusión

De acuerdo a la metodología planteada se mantuvieron los parámetros de las 6 variedades simulando estas en el modelo, en la Figuras 1 se pueden observar el comportamiento de la variedad ‘Sebago’ conforme a las condiciones climáticas y de suelo en el modelo.

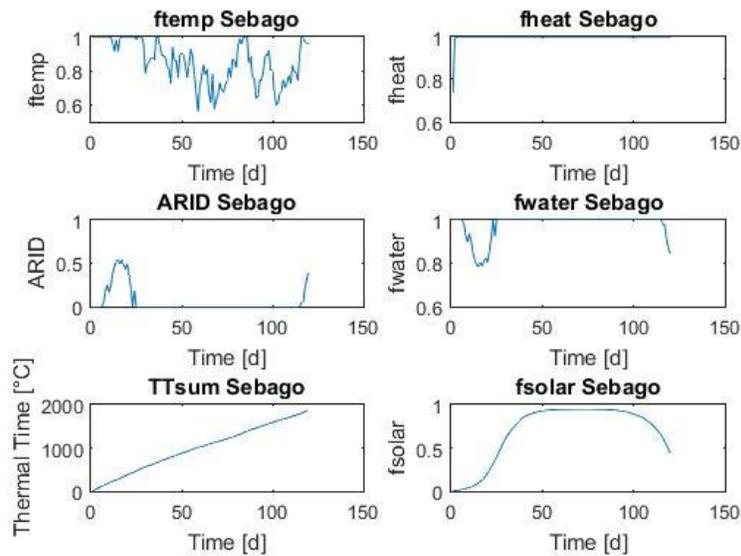


Figura 1. Comportamiento del modelo usando los parámetros de la variedad ‘Sebago’ para el experimento.

El comportamiento para todas las variedades fue el mismo con excepción en la función fsolar debido a que solo se variaron los parámetros de variedad afectando directamente esta función pudiéndose observar en la Figura 2.

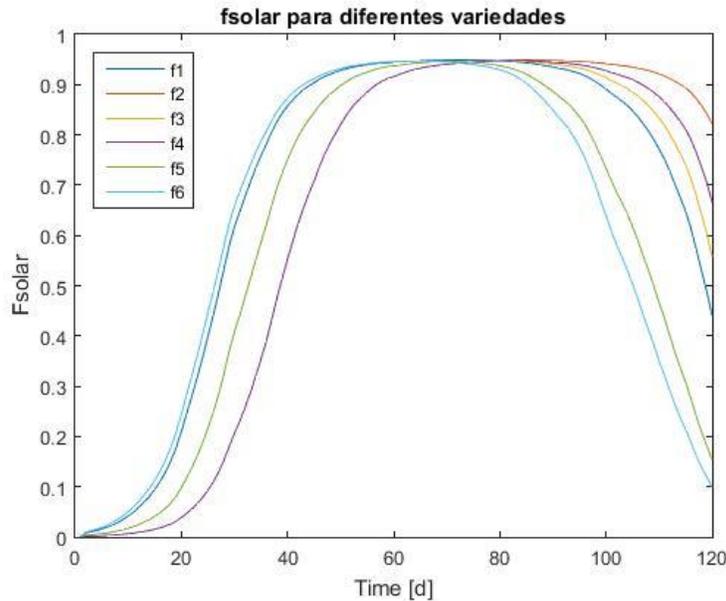


Figura 2. Función fsolar para cada una de las variedades: f1(Sebago), f2(Desiree), f3(Zibaihua), f4(Jingua), f5(Russet Burbank) y f6(Hilite Russet).

De acuerdo al comportamiento de fsolar se espera que la mayoría de las variedades simuladas no alcancen la madurez fisiológica; la simulación de la biomasa acumulada se realizó al día 102 después de la siembra (09/02/2009) ya que hasta ese día se tuvieron datos de biomasa para la variedad 'Alpha'. En la Figura 3 se observa que la biomasa de las variedades Jingua y Russet fueron la que más se aproximaron con el primer muestreo de Alpha, sin embargo ninguna variedad represento el comportamiento del crecimiento de Alpha, obteniendo biomásas muy bajas, recalcando la importancia de la calibración.

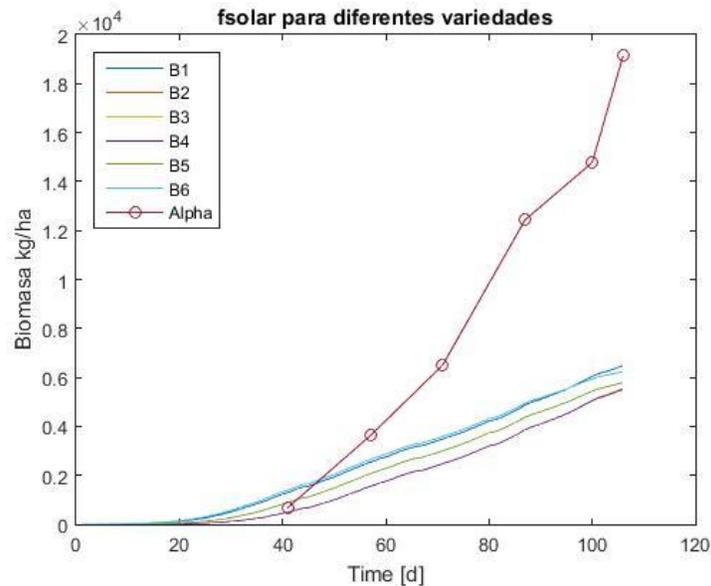


Figura 3. Biomasa acumulada al día 106 para cada una de las variedades: B1 (Sebago), B2 (Desiree), B3 (Zibaihua), B4 (Jingua), B5 (Russet Burbank), B6 (Hilite Russet) y 'Alpha' (Real).

El primer parámetro a calibrar fue RUE de acuerdo con el experimento de la variedad Sebago en 1970, este es el único experimento que contiene información de radiación incidente que coincide para el día juliano del experimento Alpha contando con 53 días de información para las fechas de 31 de octubre al 22 de diciembre del mismo año. Se comparó la radiación incidente de ambos experimentos obteniendo que la radiación del experimento Sebago fue en promedio 3 veces más que la de Alpha en el tiempo analizado por lo que se multiplicó el parámetro RUE del artículo por este factor teniendo un RUE inicial para Alpha de 3.9. La calibración se realizó manualmente basándose en el criterio de mínimos cuadrados, dando como resultado los parámetros del Cuadro 2.

Cuadro 2. Valores de los parámetros calibrados para Alpha.

Parámetros	Valor
Tsum (°C d)	1760
HI	0.81
I50A (°C d)	700
I50B (°C d)	200
Tbase (°C)	5.0
Topt (°C)	20.5
RUE	4.8

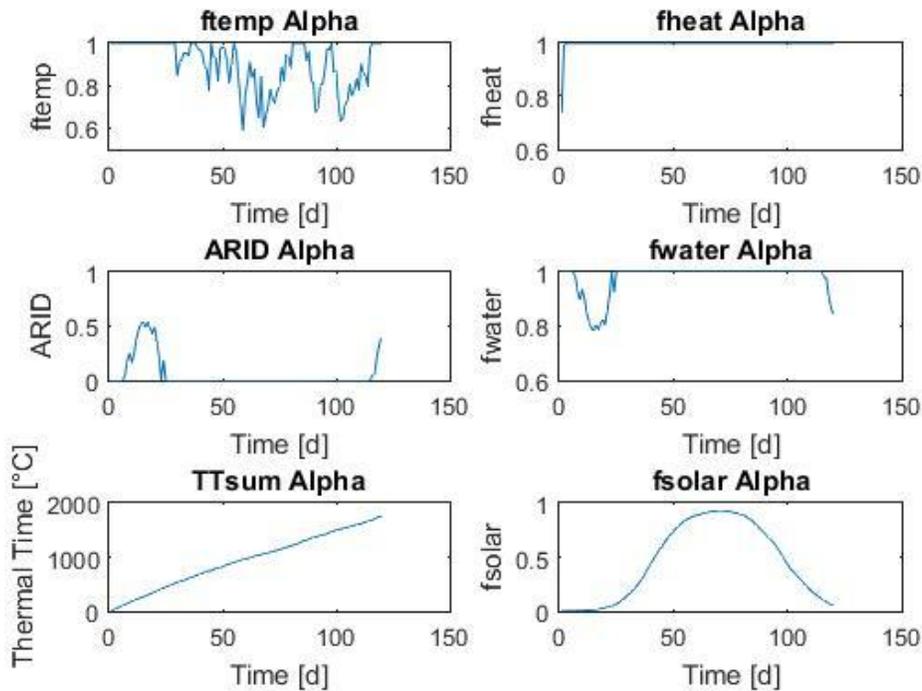


Figura 4. Comportamiento del modelo usando los parámetros calibrados para 'Alpha'.

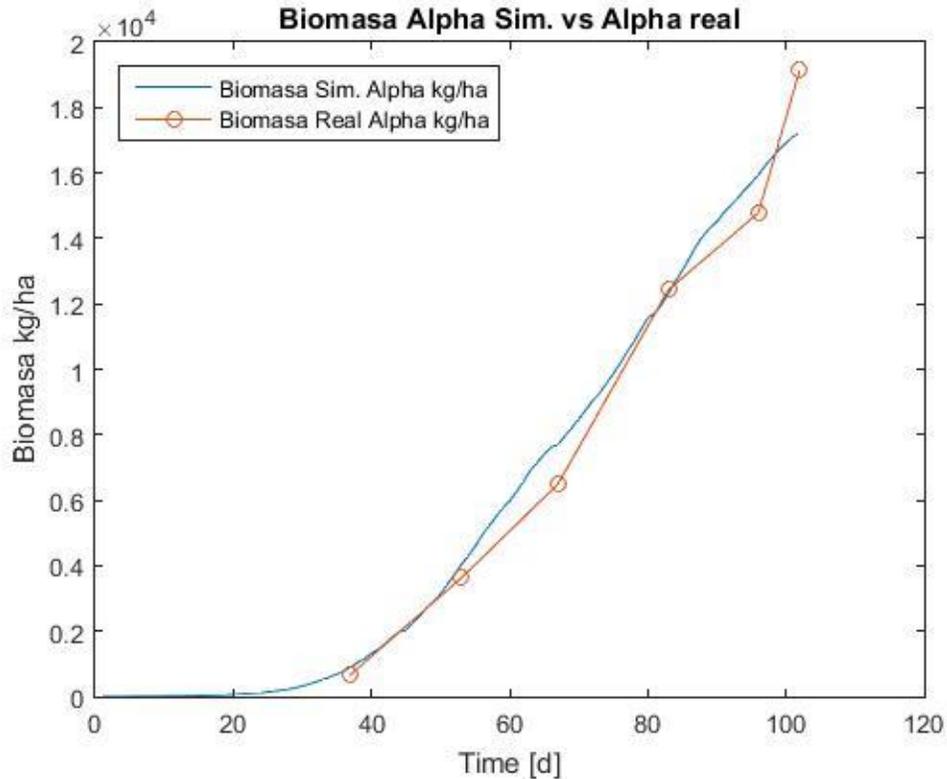


Figura 5. Simulación de biomasa acumulada para Alpha con parámetros calibrados vs observada.

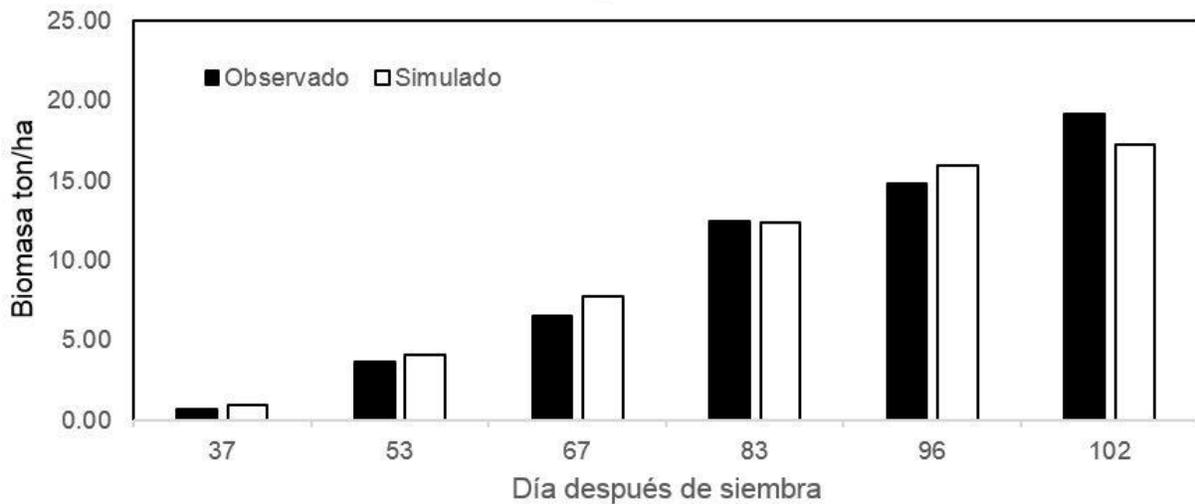


Figura 6. Biomasa simulada y observada de Alpha.

De acuerdo con los estadísticos de prueba: RMSE (1.05 ton/ha), RRMSE (11.08%), d (0.986) y NSE (0.973), indican un buen ajuste del modelo.



Conclusiones

- Usando los parámetros de las seis variedades de papa reportados en Zhao et., al (2019), ninguna simuló adecuadamente el crecimiento observado para la variedad 'Alpha' en Mochis, Sinaloa. Por lo que se necesitó hacer una calibración de los parámetros siendo RUE y la $f(\text{solar})$ los más importantes, debido a que el modelo está basado en la eficiencia del uso de la radiación.
- Una vez calibrado el modelo tuvo un buen ajuste para el experimento de acuerdo con los estadísticos por lo que es capaz de simular la biomasa acumulada para Alpha en Mochis, Sinaloa.
- Se recomienda realizar un análisis de sensibilidad para determinar los parámetros más importantes que deben ser calibrados usando un método de optimización.

Referencias Bibliográficas

- Food and Agriculture Organization Statistical (FAOSTAT). (2019). FAO Statistical Database 2019. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Rome, Italy. Consultado el 10/06/2019 en: <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>
- Hodges T., S. L. Johnson and B. S. Johnson (1992). A modular structure for crop simulation models: implemented in the SIMPOTATO model. *Agronomy Journal* 84:911-915
- Jones J. W., G. Hoogenboom, C. H. Porter, K. J. Boote, W. D. Batchelor, L. A. Hunt, P. W. Wilkens, U. Singh, A. J. Gijsman and J. T. Ritchie (2003). DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy* 18:235-265.
- Kooman PL and AJ Haverkort (1995). Modelling development and growth of the potato crop influenced by temperature and daylength: LINTUL-POTATO. In: *Potato ecology and modelling of crops under conditions limiting growth*. AJ Haverkort, DKL Mackerron. Eds. pp, 41-59, Kluwer Academic Publ., Dordrecht, The Netherlands.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2008). Año internacional de la papa. FAO. Roma, Italy. Consultado en el 12/07/2019 en: <http://www.fao.org/potato-2008/es/lapapa/index.html>
- Rabbinge, R., (1993). The ecological background of food production. In: *Crop Protection and Sustainable Agriculture*. Ciba Foundation Symposium 177. John Wiley and Sons, Chichester, UK. p. 2-29
- Raes D., P. Steduto, T. C. Hsiao and E. Fereres (2009). *AquaCrop. Reference Manual*. FAO, Rome, Italy. 218 p.



Ruíz Pérez Vladimir. (2014). La modelación biológica con fines de planeación de distritos de riego. Tesis de maestría, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Edo. De México.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2018). Atlas Agroalimentario 2012-2018. (1ra ed.). México: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP).

United States Department of Agriculture Natural (USDA), Resources Conservation Service (RCS) & Conservation Engineering Division (CED). (1986). Urban Hydrology for Small Watersheds. USDA-RCS-CED. Technical Release.55 Second Ed.

Woli, P., Jones, J., Ingram, K., Fraise, C., 2012. Agricultural reference index for drought (ARID). Agron. J. 104 (2), 287–300.

Zhao, C., Liu B.,, Xiao, L., Hoogenboom, G., Boote, K. J., Kassie, B. T., Pavan, W., Shelia, V., Kim, K. S., Hernandez-Ochoa, I. M., Wallach, D., Porter, C. H., Stockle, C. O., Zhu, Y., Asseng, S. (2019). A SIMPLE crop model, European Journal of Agronomy. Volume 104, 2019, 97-106, ISSN 1161-0301.

<https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.01.009>