

Calibración y validación del modelo APEX para tres cultivares de papa producidos en la región andina boliviana

Calibration and Validation of the APEX Model for three Potato Cultivars Produced in the Bolivian Andean Region

*Carlos Eduardo Quezada Lambertin **

*Javier Osorio Leyton ***

*Jean Paul Benavides López ****

Resumen

El presente estudio busca calibrar y validar el modelo de simulación APEX para el estudio de los factores que inciden en los bajos rendimientos de tres genotipos de papa de alta importancia para la seguridad alimentaria de la región andina boliviana. Se realizó un análisis de sensibilidad, y se calibró y validó el modelo en base a datos secundarios de las localidades de Toralapa (Cochabamba) y Patacamaya (La Paz). Además, se evaluó el potencial del modelo para la toma de decisiones hacia una producción sostenible de papa. Los resultados muestran que el modelo simula adecuadamente el crecimiento de los tres cultivares en las condiciones agroecológicas de la región andina de Bolivia. Por lo tanto, puede ser empleado para estudiar

* Instituto de Investigaciones Socio-Económicas, Universidad Católica Boliviana "San Pablo", La Paz, Bolivia.
Contacto: cae.qlamb@gmail.com

** Blackland Research Center, Texas A&M AgriLife Research, Temple, TX, Estados Unidos de América.
Contacto: josorio@brc.tamus.edu

*** Instituto de Investigaciones Socio-Económicas - Universidad Católica Boliviana "San Pablo", La Paz, Bolivia.
Contacto: jbenavides@ucb.edu.bo

el impacto en la producción de proyectos productivos, tecnologías, prácticas de manejo y cambio climático, y así poder diseñar estrategias que mejoren la productividad de papa.

Palabras clave: Producción de papa; modelos de simulación; APEX; productividad; región andina.

Abstract

The purpose of this study is to calibrate and validate the APEX simulation model for the study of three potato genotypes highly important for the economy and food security of the Bolivian Andean region. An automatic sensitivity analysis was performed, and the model calibration and validation were based on secondary data from studies carried out in Toralapa (Cochabamba) and Patacamaya (La Paz) communities. In addition, the potential of the model for decision-making towards sustainable production of potato was evaluated. The results obtained indicate that the model simulates adequately the growth of the three cultivars under the Andean agroecological conditions. Consequently, it can be used to study the impact on potato production of productive projects, technologies, management practices, and climate change, and thus, design strategies to improve potato productivity.

Key words: Potato production; crop simulation models; APEX; yield; Andean region.

Clasificación/Classification JEL: C15, Q10, Q18

1. Introducción

Bolivia es uno de los centros de origen de cultivo de la papa, el cual se encuentra entre los cultivos más importantes para el país. En 2019 se reportaron 175 mil ha dedicadas a su producción; situando a la papa como el cuarto producto con mayor superficie cultivada después de la soya, el maíz y sorgo; y ocupa además el tercer lugar entre los cultivos con mayor producción, con casi 1.3 millones de toneladas (BDP, 2019; Condori *et al.*, 2008). La papa cumple un importante rol en la seguridad alimentaria de las familias de la región andina de Bolivia, aportando con el 50% de la energía alimentaria. Es una considerable fuente de ingresos para la agricultura familiar y genera aproximadamente 134 mil fuentes de empleo directo y 200 mil fuentes indirectas (INE, 2017; Saavedra *et al.*, 2014; Tito-Velarde y Wanderley,

2021; Torrico, 2018). A todo esto se suma, por un lado, el aporte de la producción de papa a la agrobiodiversidad de los sistemas agrícolas, dada la variedad de especies y subespecies que incluyen los pequeños productores andinos en las campañas agrícolas; y por otro parte, el hecho de que gran parte de estos sistemas basan la planificación de la producción de otros cultivos en torno a la papa (Canqui y Morales, 2009; Condori *et al.*, 2014; Luque, 2018).

A pesar de su importancia, Bolivia no llega a satisfacer la demanda interna de este producto. En efecto, una publicación de Fundación TIERRA (2019), indica que el año 2000 se importaron 1,282 toneladas de papa, mientras que en el año 2017 se llegó a importar 33,430 toneladas, lo que se traduce en un incremento en la importación en un 2500%, mientras que el aumento de la producción nacional estuvo casi estancado. El bajo rendimiento promedio disminuye la competitividad de los productores locales con la papa importada. Éste se mantuvo constante a lo largo de los últimos años, e incluso mostró decrecimiento entre los años 2006 y 2015, cuando el rendimiento promedio nacional se redujo de 6.3 MG ha⁻¹, a 5.8 MG ha⁻¹ (INE, 2017; Prudencio, 2017). En comparación con los demás países productores de papa de la región, Bolivia presenta el rendimiento más bajo, siendo 2.3 veces menor que Paraguay y 3 veces menor que Perú el año 2010 (Prudencio, 2012). Adicionalmente, el contrabando desincentiva su producción: el 2010 se tradujo en un monto de 13 millones de dólares (Prudencio, 2017). Todo esto, además de otros factores, repercute directamente en el pequeño productor agrícola, que no puede competir con los precios de la papa que ingresa legal e ilegalmente desde Perú principalmente.

En la región andina, los bajos rendimientos de papa se ven influenciados tanto por factores políticos, socioeconómicos y culturales como por características intrínsecas de la producción (CIDES-UMSA, 2016; Condori *et al.*, 2008). Respecto a estas últimas; el clima, la disponibilidad de agua, la erosión y baja fertilidad del suelo, el manejo de nutrientes, plagas y enfermedades y el poco conocimiento respecto al crecimiento y los procesos de producción tienen alto impacto en el rendimiento (Luque, 2018; Rojas y Ledent, 2014; Saavedra *et al.*, 2014). Estudiar todos estos factores en su conjunto y el grado de influencia de cada uno en la producción resulta complejo, ya que los procesos más comunes utilizados para este objetivo suelen ser experimentos de campo, que requieren de tiempo, equipos de medición y recursos económicos (Kephe *et al.*, 2021). Es por esta razón que se vienen desarrollando y aplicando

modelos de simulación de cultivos como una alternativa de bajo costo y efectiva para el estudio de la producción agrícola en todo el mundo (Choruma *et al.*, 2019).

Desde finales de los años 60s se han desarrollado y aplicado modelos de simulación de cultivos, con el objetivo de estudiar procesos relacionados a la producción agrícola. Estas herramientas informáticas son capaces de representar las interacciones agrofisiológicas, medioambientales y de manejo del desarrollo y crecimiento de una gran variedad de cultivos (Keulen, 2013). Los modelos de simulación han facilitado el estudio de las actividades productivas en diferentes partes del mundo, con el fin de ayudar en la toma decisiones más efectivas con relación a la producción agrícola.

En efecto, se han empleado modelos de simulación, por ejemplo, para evaluar la respuesta de los cultivos a diferentes escenarios de cambio climático; el impacto en los rendimientos y cuencas hidrológicas de estrategias de conservación hipotéticas; así como la influencia y desempeño de posibles sistemas y volúmenes de riego en la productividad (Le *et al.*, 2018; Luo y Wang, 2019; Rosenzweig *et al.*, 2014; Saseendran *et al.*, 2008).

Sin embargo, la aplicación de modelos de simulación para la papa ha sido escasa en comparación con otros cultivos (White *et al.*, 2011). La escasa utilización de estos modelos en Latinoamérica se debe a que la mayoría de estos modelos están parametrizados para variedades que no son comúnmente cultivadas y consumidas en la región (Condori *et al.*, 2014). De esta manera, los pocos estudios en la región se enfocaron principalmente en parametrizar, calibrar y validar los modelos empleados para variedades de papa locales, de interés económico y alimenticio de cada país (Condori *et al.*, 2016).

En Bolivia, los escasos estudios que aplican modelos de simulación para la papa (Condori *et al.* 2008, 2010 y 2014) han empleado principalmente el modelo SOLANUM, basado en LINTUL. Estas investigaciones caracterizaron y obtuvieron los parámetros agrofisiológicos de las 10 variedades más producidas en la región andina boliviana, cuatro genotipos nativos: Ajahuiri (*S. ajanhuiri*), Luki (*S. juzepczukii*), Gendarme y Waycha (*S. tuberosum ssp. andigena*); un genotipo introducido: Alpha (*S. tuberosum ssp. tuberosum*) y cinco híbridos (Condori, Tunari, Sajama, Illimani y Totoreña). Estas investigaciones mostraron la gran brecha existente entre el rendimiento potencial con respecto a los rendimientos reales promedio en el país. Los autores obtienen rendimientos potenciales que oscilan entre 28 y 40 MG ha en condiciones

agroecológicas naturales de la región. Estos estudios y la aplicación de SOLANUM son un gran aporte para el conocimiento de los procesos de crecimiento de las variedades de papa más comunes de la región y para estimar el rendimiento potencial en diferentes condiciones agroecológicas. No obstante, el modelo SOLANUM no tiene la capacidad de evaluar el impacto en la producción de papa de factores como las prácticas de manejo, los tipos y cantidad de fertilizantes, infraestructura agrícola, calidad y erosión del suelo, así como el impacto medioambiental resultante del incremento en la producción del cultivo (Condori *et al.*, 2017).

En este sentido, es necesario profundizar el conocimiento de los factores que inciden en la brecha entre el rendimiento potencial y real de la papa en Bolivia, así como evaluar el impacto medioambiental resultante del incremento en la producción del cultivo. Al respecto, el modelo APEX (Agricultural Policy/Environmental eXtender) es una herramienta capaz de simular procesos medioambientales relacionados al manejo y uso del suelo en parcelas, granjas o pequeñas cuencas, así como de simular las interacciones e impactos en la producción y rendimiento de cultivos de diferentes factores y prácticas de manejo como el clima, el suelo, la topografía, la rotación de cultivos, la fertilización, el riego, el control de malezas, la aplicación de pesticidas, el terraceo, las franjas de amortiguamiento, etc. (Gassman *et al.*, 2010; Le *et al.*, 2018; Luo y Wang, 2019). Además, es uno de los modelos de simulación de cultivos más importantes en relación a la investigación académica (Asseng *et al.*, 2014; Gassman *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2015), por lo que esta herramienta puede aportar significativamente al estudio y mejora de la producción de papa de la región andina de Bolivia.

Sin embargo, dado que el modelo es capaz de simular una gran variedad de procesos ambientales, requiere también del ajuste de varios de parámetros relacionados a la parcela, características del suelo, crecimiento del cultivo y condiciones biofísicas del área de estudio. Por lo tanto, antes de poder emplear esta herramienta, es necesaria la calibración y validación del modelo para asegurar que pueda representar adecuadamente los procesos de crecimiento de las diferentes variedades de papa producidas en los Andes, así como las condiciones agroecológicas locales. Es por este motivo que el presente documento tiene como objetivo calibrar y validar el modelo de simulación APEX para tres genotipos de papa: *Solanum tuberosum ssp. andigena* (Waycha), *Solanum juzepczukii* (Luki) y *Solanum tuberosum ssp.*

tuberosum (Alpha); de alta importancia socioeconómica y para la seguridad alimentaria en la región andina boliviana.

2. Metodología

2.1. Parametrización del modelo APEX

El presente documento se basa en datos secundarios de experimentos de campo llevados a cabo por Condori *et al.* (2008 y 2010) y Condori Mamani, (2005) en comunidades de la región andina de Bolivia, y se enfoca en calibrar y validar el modelo APEX para el crecimiento de tres cultivos de papa. Por lo tanto, el primer paso antes de la calibración consiste en la parametrización del modelo APEX a partir de la introducción de datos e información disponibles de los sitios evaluados, suelo, clima, prácticas de manejo desarrolladas en los experimentos de campo, parámetros agrofisiológicos de los cultivos de papa, tipos y cantidades de fertilizantes empleados, volumen de riego aplicado, así como los equipos y maquinaria utilizados durante toda la campaña agrícola de estudio. Se configuró la versión APEX 1051 de forma manual a través de la interfaz basada en Excel, APEXeditor. A continuación, se describe cada “grupo” de datos que se consideró en la parametrización del modelo.

2.1.1. Zona de estudio

Como se mencionó previamente, los datos con los que se calibra y valida el modelo APEX en el presente documento provienen de experimentos de campo secundarios llevados a cabo en dos comunidades de la región andina boliviana. En ambas comunidades se cultivó en parcelas entre 21 y 29.4 m² por cada cultivo de papa, donde cada parcela fue tratada en el modelo como una sola unidad hidrológica de uso de suelo homogénea, desconectada de otras áreas o usos de suelo. La calibración se llevó a cabo a partir de datos medidos en parcelas de la localidad de Toralapa, ubicada en los valles interandinos del municipio de Tiraque del departamento de Cochabamba, para la campaña agrícola 1993-1994. Para la validación se emplean los datos medidos en parcelas de la localidad de Patamaya, ubicada en la zona semiárida del altiplano boliviano, en el municipio de Patamaya del departamento de La Paz,

para la campaña agrícola 1998-1999. El Cuadro 1 recopila información general de las zonas de estudio que se incluyó en los componentes SITE.SIT y SUBS.SUB de APEX.

Cuadro 1
Datos generales de la zona de estudio

Parámetro	Valor	
Localidad	Toralapa	Patacamaya
Campaña agrícola	1993-1994	1998-1999
Latitud	-17.517	-17.24
Longitud	-65.667	-67.92
Altitud [msnm]	3430	3789
Área cultivada por cultivar de papa [m ²]	29.4	21.0
Pendiente [%]	3	ND
Precipitación [mm]	535	350
Temperatura mínima [°C]	4.6	4.4
Temperatura máxima [°C]	18.7	18.4
PAR [MJ m ⁻²]	9.6	10.4

ND: Información no disponible

Fuente: Condori *et al.*, (2008); Condori Mamani (2005) y Condori (2020), comunicación personal

2.1.2. Suelo

Respecto a la información del suelo, los estudios base indican que en cada comunidad antes de la siembra se realizó un muestreo de suelo representativo del área total donde se sembraron los tres cultivares. Las muestras se tomaron de una sola capa del suelo de 30 cm de profundidad en Toralapa y 20 cm de profundidad en Patacamaya. Además de la profundidad (Z), los parámetros introducidos al grupo de datos "SOIL.DAT" del modelo APEX fueron densidad aparente (BD), textura (SAN y SIL), pH, carbono orgánico (WOC) y capacidad de intercambio catiónico (CEC); y para el caso de Toralapa se contó además con los valores del punto de marchitez permanente (UW), capacidad de campo (FC) y porcentaje de saturación. En el Cuadro 2 se muestran los parámetros del suelo introducidos al modelo y sus respectivos valores para cada sitio.

Cuadro 2
Parámetros del suelo de las parcelas de estudio

Parámetro	Toralapa	Patacamaya
Profundidad [cm]	30	20
Tipo de suelo (USDA)	Franco limoso	Franco arenoso
Arena [%]	21	64
Limo [%]	51	31
Arcilla [%]	28	5
Punto de marchitez permanente [%]	15.4	ND
Capacidad de campo	27.2	ND
Densidad aparente [g/cm ³]	1.33	1.43
pH	5.6	6.36
C Orgánico [%]	1.25	0.44
Capacidad de intercambio catiónico [cmol/kg]	ND	5.06

ND: Información no disponible

Fuente: Condori et al., (2008); Condori Mamani (2005) y Condori (2020), comunicación personal

2.1.3. Clima

Uno de los grupos de parámetros más importantes para construir los modelos de simulación son las variables climáticas. El modelo APEX requiere de datos climáticos diarios para las simulaciones. En el caso de la localidad de Toralapa, se tuvo acceso a información climática diaria medida directamente en la parcela de estudio desde junio de 1993 hasta mayo de 1994. Los parámetros climáticos disponibles fueron precipitación (PRCP), radiación solar (SRAD) y temperaturas (TMAX, TMIN), por lo que la ecuación de estimación de evapotranspiración seleccionada en el conjunto de parámetros de control global del modelo “APEXCONT” fue Priestley Taylor. En el caso de Patacamaya, se tuvo acceso a información climática desde 1984 (16 años antes del periodo de estudio); sin embargo, los parámetros disponibles fueron precipitación, temperaturas y humedad relativa, siendo la ecuación de Hargreaves seleccionada para estimar la evapotranspiración potencial en las simulaciones del crecimiento de papa en esta localidad.

2.1.4. Cultivos de papa

El modelo APEX incluye en su estructura un gran número de variables agrofisiológicas de varios de cultivos. Si bien muchos de estos parámetros son similares entre especies y subespecies como la papa, existen parámetros que deben ser ajustados para cada variedad de interés. Por lo tanto, para este estudio se configuraron e introdujeron en el modelo los valores

de cinco parámetros de alta influencia en el crecimiento de los cultivares de papa (Wang *et al.*, 2015), los cuales son los únicos disponibles en la literatura científica y fueron obtenidos del modelo SOLANUM, el cual fue parametrizado a partir de los estudios base del presente documento. El Cuadro 3 agrupa a los parámetros de crecimiento introducidos en el modelo y los valores para cada cultivar de papa.

Cuadro 3
Parámetros de crecimiento de los cultivares de estudio

Parámetro	Waycha	Luki	Alpha
WA (Eficiencia de uso de radiación)	25.8	25.54	30.7
HI (Índice de cosecha)	0.72	0.83	0.92
TOP (Temperatura óptima para el crecimiento del cultivo)	17	17	17
TBS (Temperatura mínima para el crecimiento del cultivo)	4	4	4
WCY (Fracción de agua en el cultivo fresco)	0.75	0.7	0.78

Fuente: Condori *et al.* (2017)

2.1.5. Prácticas de manejo

Una de las características importantes y que diferencia a APEX de otros modelos es la capacidad de simular la influencia en los rendimientos de todo un cronograma de manejo agronómico de los cultivos. Por tal motivo, requiere la configuración de un grupo de parámetros relacionados a las operaciones y prácticas agronómicas llevadas a cabo en el área de estudio. En el caso de Toralapa, estas prácticas se iniciaron el 25 de junio de 1993, con la preparación y roturado del terreno con tractor. Las semillas de los cultivares de papa se sembraron manualmente en bloques aleatorios con cuatro repeticiones y una densidad de siembra de 4.76 plantas m⁻². Se aplicó fertilizante fosfato diamónico (18-46-00) en una concentración de 160 kg ha⁻¹ y urea (46-00-00) a 80 kg ha⁻¹. La producción en esta localidad fue a secano, se controló las malezas según lo requerido y la aplicación de pesticidas no fue necesaria.

En el caso de Patacamaya, el plan de manejo agrícola y diseño de bloques fue similar al anterior, y las concentraciones de fertilizantes empleados fueron de 261 kg ha⁻¹ para fosfato diamónico y 72 kg ha⁻¹ para urea. A diferencia de Toralapa, se aplicó riego por inundación tres veces durante toda la campaña agrícola, con volúmenes entre 18 y 26 mm. Finalmente, para los tres cultivares de papa se introdujo inicialmente el valor de 1400 para el parámetro de unidades potenciales de calor (PHU), el cual fue ajustado posteriormente en la calibración. El

Cuadro 4 compila el cronograma agronómico introducido al modelo para cada comunidad y las cantidades de fertilizante y riego aplicados.

Cuadro 4
Prácticas de manejo agronómico para los sitios de estudio

Totalapa (1993-1994)			Patacamaya (1998-1999)		
Fecha	Operación	Cantidad	Fecha	Operación	Cantidad
25-Jun	Preparación del terreno (tractor)		15-Jun	Preparación del terreno (tractor)	
22-Oct	Siembra (manual)	4.76 planta m ²	19-Oct	Siembra (manual)	4.76 planta m ²
22-Oct	Fertilización (18-46-00)	160 kg ha ⁻¹	19-Oct	Fertilización (18-46-00)	261 kg ha ⁻¹
24-Dic	Fertilización (46-00-00)	80 kg ha ⁻¹	14-Dec	Riego (inundación)	21.3 mm
			22-Dec	Aporque (tractor)	
22-Dic	Aporque (tractor)		22-Dec	Fertilización (46-00-00)	72 kg ha ⁻¹
			29-Dec		26 mm
15-Ene	Labranza (manual)		18-Ene	Riego (inundación)	25.7 mm
			24-Ene	Labranza (manual)	
13-Abr	Cosecha (manual)		22-Feb	Riego (inundación)	18.4 mm
			20-Abr	Cosecha (manual)	

Fuente: Condori *et al.* (2008); Condori Mamani (2005) y Condori (2020), comunicación personal

2.2. Análisis de sensibilidad

Una vez parametrizado el modelo y antes de iniciar el proceso de calibración, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad con la herramienta APEX-CUTE (Wang y Jeong, 2016). Dado que APEX requiere de una cantidad de datos y parámetros considerable, el análisis de sensibilidad se enfocó en evaluar el impacto en el crecimiento de la papa de 15 parámetros recomendados por el programa APEX-CUTE y que son parte componente del modelo "PARM.DAT". Además, se incluyó en el análisis a ocho parámetros específicos del crecimiento de cultivos incluidos en el componente "PLANTTAB". La selección de estos parámetros y sus rangos están basados en la documentación del modelo APEX (Wang *et al.*, 2012, 2014 y 2015; Williams *et al.*, 1989). Como resultado, gracias a la interfaz de usuario de uso simple y el proceso automático de la herramienta APEX-CUTE, se logró facilitar y acelerar la identificación de siete parámetros con alta influencia en el modelo, los cuales fueron seleccionados para su posterior calibración manual y se los muestra en el Cuadro 5.

Cuadro 5
Parámetros de mayor influencia en el modelo APEX para los cultivares de papa

Parámetro	Definición
Parm 2	Crecimiento de raíces-fuerza del suelo
Parm 38	Coeficiente de ponderación de estrés hídrico
Parm 41	Exponente de estrés de temperatura de la raíz
Parm 76	Gobierna la tasa de conversión muerta en residuo plano
Parm 97	Coeficiente que regula la transferencia de biomasa desde las raíces a brotes cuando el índice de área foliar es bajo
DMLA	Potencial máximo de índice de área foliar
DLAI	Fracción del periodo de crecimiento cuando el área foliar empieza a declinar

Fuente: Steglich *et al.* (2018)

2.3. Calibración del modelo

Luego de definir los parámetros con más influyentes en el modelo para el crecimiento de los tres cultivares de papa, se procedió a realizar la calibración manual de APEX. Para ello se evaluó el ajuste entre los valores simulados y observados de cada cultivar en base tres grupos de variables: i) El rendimiento del tubérculo seco final (YLD_o) en $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$; ii) el rendimiento de la biomasa seca final ($BIOM_o$) en $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, que incluye el peso del tubérculo seco, la materia seca foliar y la raíz para cada cultivar; iii) y finalmente, se ajustó el modelo en base a la curva de acumulación de biomasa seca obtenida de los estudio base, la cual es una función beta ajustada de los pesos secos de biomasa en diferentes etapas del periodo de crecimiento de la papa, donde se incluye solamente el peso del tubérculo y materia foliar y no así el peso de las raíces (Condori *et al.*, 2008).

La calibración se realizó con los datos medidos en Toralapa para la campaña agrícola 1993-1994. Se iniciaron las simulaciones el año 1979, empleando los años 1979-1992 como periodo de precalentamiento del modelo; se repitieron los datos climáticos medidos en el estudio base para los años anteriores, debido que a que no se contó con información climática de la zona de estudio para años anteriores a los experimentos. Durante el proceso, además de los parámetros definidos por el análisis de sensibilidad, se ajustaron también los valores de DLAP1 (primer punto de la curva de desarrollo óptimo del área foliar); DLAP2 (segundo punto de la curva de desarrollo óptimo del área foliar); RLAD (tasa de disminución del índice de área foliar); RBMD (tasa de disminución de la relación biomasa-energía) y PHU (unidades potenciales de calor), lo cual mejoró los resultados de las simulaciones. Por

último, para evaluar el desempeño del modelo y la correlación de los datos simulados con los observados, se emplearon los estadísticos r^2 , $PBIAS$ y NSE , los cuales fueron ampliamente usados y recomendados para evaluar el modelo APEX, así como otros modelos de simulación hidrológica, con los siguientes criterios satisfactorios de evaluación (Wang *et al.*, 2012): $r^2 \geq 0.60$; $NSE \geq 0.55$ y $PBIAS$ dentro del 25%.

2.4. Validación del modelo

La validación de un modelo permite asegurar y demostrar que éste es capaz de realizar simulaciones suficientemente precisas de algún fenómeno específico, en este caso, del crecimiento de los cultivos de papa en condiciones naturales de la región andina. Por consiguiente, se validó el modelo con información obtenida de Patacamaya, para la campaña agrícola de 1998-1999. Para el calentamiento del modelo, se tuvo acceso a información climática de 16 años antes del periodo de estudio. A diferencia de la calibración, para esta localidad se contó con datos del rendimiento de biomasa seca completa (tubérculo, materia foliar y raíces), para diferentes fases del crecimiento de las plantas; por lo tanto, se evaluó el grado de ajuste de los valores simulados con los mencionados previamente, además del rendimiento del tubérculo final. En el Cuadro 6 se muestran los valores observados para Patacamaya.

Cuadro 6
Rendimientos de biomasa y tubérculos secos finales
observados para la localidad de Patacamaya

Variables	Waycha	Luki	Alpha
BIOM _o para 85 DDS [g m ⁻²]	80.0	40.0	30.0
BIOM _o para 113 DDS [g m ⁻²]	370.0	240.0	190.0
BIOM _o para 142 DDS [g m ⁻²]	1210.0	820.0	740.0
BIOM _o para 183 DDS [g m ⁻²]	1660.0	1660.0	840.0
YLD _o [g m ⁻²]	1014.7	1217.09	657.2

DDS: Días después de la siembra

Fuente: Elaboración propia en base a Condori *et al.* (2008) y Condori Mamani (2005)

3. Resultados

3.1. Calibración

El Cuadro 7 presenta los resultados de las simulaciones de rendimientos de biomasa y tubérculo seco para la calibración en Toralapa, y muestra que el sesgo entre los valores simulados y reales es de -0.39% para Waycha; 4.35% para Luki y 2.13% para Alpha. Por otra parte, la diferencia porcentual entre los valores simulados y observados de biomasa seca completa (tubérculos, materia foliar y raíces) fueron: Waycha = 0.78%, Luki = 0.87% y Alpha = 0.88%. Si bien estos resultados muestran un desempeño adecuado del modelo para predecir los rendimientos finales de los cultivares estudiados, al tener solo un valor comparable para cada variable no se refleja completamente la capacidad del modelo de simular todo el proceso de crecimiento de la papa. Por tal motivo, los valores obtenidos de la curva de acumulación de biomasa (sin raíces) permiten complementar la evaluación del ajuste del modelo para todo el proceso de crecimiento de los cultivares de papa.

Cuadro 7
Comparación de rendimientos de biomasa y tubérculos secos
simulados y observados para la etapa de calibración del modelo

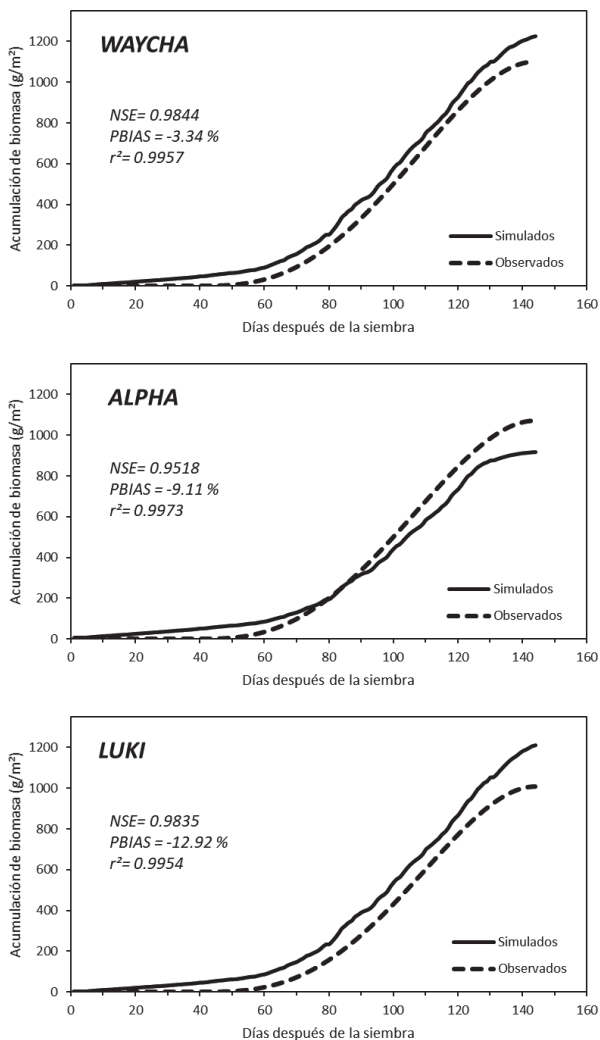
Cultivar	Tubérculo seco (YLD)			Biomasa seca total (BIOM)		
	Simulado	Observado	PBIAS	Simulado	Observado	PBIAS
Waycha [g m ⁻²]	903	899.5	-0.39%	1332	1342.5	0.78%
Luki [g m ⁻²]	998	1043.3	4.34%	1326	1337.6	0.87%
Alpha [g m ⁻²]	783	800	2.13%	922	930.2	0.88%

Fuente: Elaboración propia.

Al respecto, la curva de crecimiento de biomasa para Waycha es la que mejor ajuste presenta entre valores simulados y observados, donde los estadísticos $NSE=0.9844$; $PBIAS=-3.14\%$ y $r^2=0.9957$ indican que el modelo simuló adecuadamente el crecimiento de este cultivar, siendo que los valores están dentro de los criterios mínimos de evaluación citados anteriormente. Para el caso de Luki, se obtuvo un NSE y r^2 , de 0.9835 y 0.9954, con una diferencia poco significativa respecto al anterior cultivar; por otro lado, el valor $PBIAS$ sí presenta una mayor diferencia (-12.92%). Los valores de $PBIAS$ y r^2 para Alpha muestran un alto grado de ajuste de ambas curvas; sin embargo, el coeficiente de NSE resulta el menor de los tres cultivares, con un valor de 0.9518. El Gráfico 1 muestra la comparación entre los valores simulados y

observados de la acumulación de biomasa sin raíces, además de los indicadores estadísticos del desempeño del modelo para cada cultivar.

Gráfico 1: Valores simulados y observados de la acumulación de biomasa para cada cultivar, Toralapa



Fuente: Elaboración propia.

3.2. Validación

El sesgo entre los valores observados y simulados de los rendimientos de biomasa y tubérculo finales para la validación en Patacamaya muestra un buen desempeño del modelo al momento de estimar los valores cosechados de papa. El modelo para Waycha es el que mejor se ajusta a los datos observados para el rendimiento de tubérculo seco, seguido de Luki y Alpha, con una diferencia poco significativa entre estos últimos. Si bien el modelo para Alpha es el que mejor ajuste muestra para el rendimiento final de biomasa seca, este modelo es el que más sesgo presenta al comparar la simulación con valores medidos a lo largo del crecimiento de las plantas. El Cuadro 8 muestra la comparación entre los valores simulados y observados de los rendimientos finales de tubérculo y biomasa seca (cosecha).

Cuadro 8
Rendimientos finales de biomasa y tubérculos secos simulados
y observados para la localidad de Patacamaya

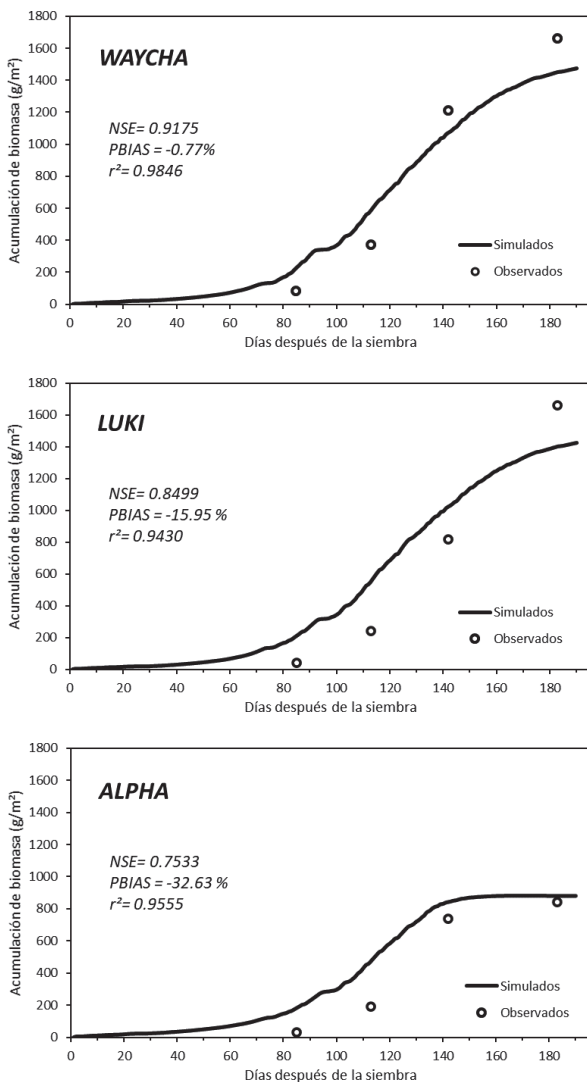
Cultivar	Tubérculo seco (YLD)			Biomasa seca total (BIOM)		
	Simulado	Observado	PBIAS	Simulado	Observado	PBIAS
Waycha [g·m ⁻²]	1004	1015	1.06%	1486	1660	10.48%
Luki [g·m ⁻²]	1085	1217	10.85%	1441	1660	13.19%
Alpha [g·m ⁻²]	730	657	-11.08%	885	840	-5.36%

Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la curva de acumulación de biomasa seca, el modelo simula adecuadamente este proceso para los tres cultivares. El mejor ajuste que se obtuvo es el modelo para Waycha; este sobreestima el rendimiento de biomasa seca hasta aproximadamente los 120 DDS, y posteriormente decae y presenta un rendimiento final 10% menor. Para el caso de Luki, como se muestra en el Gráfico 2, los valores simulados y observados presentan un buen ajuste; en este caso el modelo sobreestima los rendimientos hasta casi los 160 DDS y posteriormente subestima el rendimiento final con una diferencia de aproximadamente 13%. El modelo para Alpha presenta un mejor resultado al momento de simular el rendimiento final; a pesar de ello, es el que más diferencia muestra entre los valores medidos y observados a lo largo del periodo de crecimiento, sobreestimando los rendimientos durante todo este proceso. A continuación, el Gráfico 2 muestra la comparación entre la curva de crecimiento simulada (acumulación de biomasa seca) con los valores observados, además de los indicadores estadísticos para

la validación del modelo, los cuales están dentro de los criterios de evaluación mínimos, exceptuando el valor de *PBIAS* para Alpha.

Gráfico 2: Valores simulados y observados de la acumulación de biomasa para cada cultivar, Patacamaya



Fuente: Elaboración propia.

4. Discusión

La identificación automática con la herramienta APEX-CUTE de los parámetros con alta influencia en las simulaciones del crecimiento de los cultivares de papa facilitó el proceso de calibración manual del mismo. Después de ajustar cinco parámetros del componente PARM. DAT (2, 38, 41, 76 y 97), seis parámetros del componente de crecimiento de cada cultivar de papa (DMLA, DLAI, DLAP1, DLAP2, RLAD y RBMD) y las unidades potenciales de calor (PHU); el modelo simuló adecuadamente los rendimientos de biomasa y tubérculos secos. Consecuentemente, todos los indicadores estadísticos para medir el desempeño del modelo para el sitio de calibración (Toralapa) se encuentran dentro del criterio mínimo satisfactorio recomendado por Wang *et al.* (2012).

De la misma forma, los resultados de la validación para el periodo 1998-1999 en Patacamaya indican que el modelo es robusto para simular el crecimiento y rendimiento de los cultivares *S. tuberosum ssp. andigena* (Waycha), *S. juzepczukii* (Luki) y *S. tuberosum ssp. tuberosum* (Alpha), en las condiciones agroecológicas de la región andina boliviana. El cultivar Waycha presenta el mejor ajuste y buenos indicadores estadísticos, mientras que el desempeño del modelo para simular el crecimiento del cultivar Alpha es el menos efectivo. Esto puede deberse a que Alpha, al ser una variedad introducida, tiene menor tolerancia a las bajas temperaturas en comparación con los otros cultivares (Condori *et al.*, 2014); por lo tanto, las bajas temperaturas registradas hasta antes de los 28 DDS en Patacamaya pueden haber influido en los bajos rendimientos reales y en la sobrestimación del modelo desde el inicio del proceso de crecimiento, ya que en la calibración del modelo no se ajustaron los parámetros de los cultivos relacionados a la tolerancia a heladas (FRST1 y FRST2).

Ante la poca disponibilidad de estudios que han empleado modelos de simulación en Bolivia, y en comparación con otros modelos, la capacidad de APEX de simular una amplia gama de procesos ambientales y prácticas agrícolas muestran una clara ventaja y potencial para la investigación y toma de decisiones que apunten a mejorar la producción de papa, ya sea a nivel parcela, microcuenca o incluso regional. Consecuentemente, la aplicación del modelo validado en este estudio se proyecta, en comparación con los tradicionales experimentos de campo, como una alternativa efectiva y de bajo costo y requerimiento de personal, para trazar

el camino hacia una producción de papa más sostenible y rentable, ya sea en localidades del Altiplano, como Patacamaya, o en valles interandinos, como Toralapa.

Ahora bien, en busca de hacer frente a los problemas más comunes con los que lidian los pequeños productores de papa de Bolivia, desde una perspectiva de sostenibilidad se puede inicialmente enfocar la aplicación del modelo APEX hacia los siguientes aspectos: i) identificación de las mejores alternativas de fertilizantes y optimización de su aplicación; ii) estimación del impacto de posibles proyectos de riego en la producción de papa y mejora en la eficiencia del uso del agua; iii) evaluación a largo plazo del impacto en los rendimientos de papa de prácticas de conservación que ayuden a reducir la degradación del suelo, la erosión y la contaminación del suelo, y cuerpos de agua por nitratos; iv) y finalmente, evaluación de los impactos del cambio climático en la producción de papa en escenarios hipotéticos, dado que el modelo tiene el potencial de integrar escenarios futuros, variando parámetros climáticos y concentraciones de CO² (Rinaldi y de Luca, 2012).

5. Conclusiones

El modelo APEX reprodujo con precisión el proceso de crecimiento y rendimientos finales para tres cultivares de papa de alta importancia para la economía y seguridad alimentaria de la agricultura familiar en Bolivia. Los resultados obtenidos después del proceso de calibración y validación indican que APEX puede ser utilizado como una herramienta para la toma de decisiones y el diseño de estrategias que busquen mejorar la producción de papa en las condiciones agroecológicas de la región andina boliviana.

El modelo APEX construido en la presente investigación puede ser aplicado para el estudio no solo de la especie y subespecie más común en todo el mundo, *Solanum tuberosum* ssp. *tuberosum* (Alpha), sino también para evaluar y mejorar la producción de variedades nativas como *Solanum tuberosum* ssp. *andigena* (Waycha) y *Solanum juzepczukii* (Luki). Para mejorar los resultados obtenidos en este estudio, se recomienda evaluar los parámetros relacionados a la tolerancia de heladas de los cultivares (FRST1 y FRST2), lo cual permitirá incrementar la robustez del modelo y representar de forma más precisa el impacto de las bajas temperaturas en las dinámicas de crecimiento de los sistemas agrícolas basados en la papa, y por consiguiente, diseñar sistemas más resilientes a partir de la mejora en estrategias

de manejo de la agrobiodiversidad. Finalmente, a partir del presente modelo será posible proyectar futuras investigaciones hacia el análisis de escenarios de cambio climático y diseñar estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático efectivas y adecuadas al contexto local de los sistemas agrícolas de Bolivia basados en la papa.

Fecha de recepción: 16 de junio de 2021

Fecha de aceptación: 27 de julio de 2021

Manejado por IISEC

Referencias

1. Asseng, S., Zhu, Y., Basso, B., Wilson, T. y Cammarano, D. (2014). Simulation Modeling: Applications in Cropping Systems. *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*, 5, 102-112. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52512-3.00233-3>
2. Banco de Desarrollo Productivo, BDP (2019). *Mapa de complejidades*. Banco de Desarrollo Productivo. <https://complejidades.bdp.com.bo/mapa>
3. Canqui, F. y Morales, E. (2009). *Conocimiento local en el cultivo de la papa*. Fundación PROIMPA.
4. Choruma, D., Balkovic, J. y Odume, O. N. (2019). Calibration and validation of the EPIC model for maize production in the Eastern Cape, South Africa. *Agronomy*, 9(9), 1-16. <https://doi.org/10.3390/agronomy9090494>
5. CIDES-UMSA (2016). Desarrollo rural en Bolivia: visiones sociales e institucionales. *Umbrales*, 30, p. 368).
6. Condori, B., Casa, A. de, Soratto, P., Olarte, S., Mompies, J., Clavijo, N. L., Vilaró, F. y García, C. (2016). *Modelación de la papa en Latinoamérica: estado del arte y base de datos para parametrización*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2788/11877>
7. Condori, B., Hijmans, R. J., Quiroz, R. y Ledent, J. F. (2010). Quantifying the expression of potato genetic diversity in the high Andes through growth analysis and modeling. *Field Crops Research*, 119(1), 135-144. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.07.003>
8. ----- (2014). Managing potato biodiversity to cope with frost risk in the high Andes: A modeling perspective. *PLoS ONE*, 9(1), 1-11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0081510>
9. Condori, B., Mamani, P., Botello, R., Patiño, F., Devaux, A. y Ledent, J. F. (2008). Agrophysiological characterisation and parametrisation of Andean tubers: Potato (*Solanum* sp.), oca (*Oxalis tuberosa*), isaño (*Tropaeolum tuberosum*) and papalisa (*Ullucus tuberosus*). *European Journal of Agronomy*, 28(4), 526-540. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2007.12.002>
10. Condori, B., Quiroz, R., Barreda, C., Gavilan, C., Guerrero, J. y Osorio, J. (2017). *Solanum: A potato production simulation model*. International Potato Center. <https://doi.org/10.21223/P3/E71OS6>

11. Condori Mamani, J. (2005). *Validación del modelo de simulación Lintul para cuantificar el rendimiento potencial de diferentes especies de papa en el altiplano central-La Paz*. Universidad Mayor de San Andrés.
12. Fundación Tierra (2019). *Efectos de la importación de alimentos sobre la producción campesina-indígena*. Fundación Tierra.
13. Gassman, P.W., Williams, J. R., Wang, X., Saleh, A., Osei, E., Hauck, L. M., Izaurrealde, R. C. y Flowers, J. D. (2010). The Agricultural Policy/Environmental eXtender (APEX) model: An emerging tool for landscape and watershed environmental analyses. *Transactions of the ASABE*, 53(3), 711-740.
14. Gassman, Philip W., Williams, J. R., Benson, V. W., Izaurrealde, R. C., Hauck, L. M., Jones, C. A., Atwood, J. D., Kiniry, J. R., & Flowers, J. D. (2004). Historical development and applications of the EPIC and APEX models. *ASAE Annual International Meeting 2004*, 2033–2064. <https://doi.org/10.13031/2013.17074>
15. Instituto Nacional de Estadística, INE (2017). *Encuesta Nacional Agropecuaria 2015*. La Paz, Bolivia.
16. Kephe, P. N., Ayisi, K. K. y Petja, B. M. (2021). Challenges and opportunities in crop simulation modelling under seasonal and projected climate change scenarios for crop production in South Africa. *Agriculture and Food Security*, 10(1), 1-24. <https://doi.org/10.1186/s40066-020-00283-5>
17. Keulen, V. (2013). Simulation Models as Tools for Crop Management. In P. Chirstou, R. Savin, B. A. Costa-Pierce, I. Miztal y C. Bruce A. Whitelaw (eds.), *Sustainable Food Production*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5797-8>
18. Le, K. N., Jeong, J., Reyes, M. R., Jha, M. K., Gassman, P. W., Doro, L., Hok, L. y Boulakia, S. (2018). Evaluation of the performance of the EPIC model for yield and biomass simulation under conservation systems in Cambodia. *Agricultural Systems*, 166 (July), 90-100. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.08.003>
19. Luo, Y. y Wang, H. (2019). Modeling the impacts of agricultural management strategies on crop yields and sediment yields using APEX in Guizhou Plateau, southwest China. *Agricultural Water Management*, 216 (April 2018), 325-338. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.01.018>
20. Luque Salcedo, M. (2018). *Caracterización de parámetros vulnerables de 50 variedades de papa nativa (Solanum sp.) en dos comunidades del Municipio de Batallas*. Universidad Mayor de San Andrés.

21. Prudencio, J. (2012). *Seguridad alimentaria: Promoviendo un debate necesario*. COSUDE.
22. ----- (2017). *El sistema agroalimentario en Bolivia y su impacto en la alimentación y nutrición (Análisis de situación 2005-2015)*. <https://julioprudencio.com/index.php/2017/09/08/el-sistema-agroalimentario-y-su-impacto-en-la-alimentacion-y-nutricion-2017/>
23. Rinaldi, M. y de Luca, D. (2012). Applications of EPIC model to assess climate impact on sorghum in southern Italy. *Italian Journal of Agronomy*, 7(1), 74-85. <https://doi.org/10.4081/ija.2012.e12>
24. Rojas Mamani, P. y Ledent-Francois, J. (2014). Efecto de la sequía en la morfología, crecimiento y productividad de genotipos de papa (*solanum tuberosum* L.) en Bolivia. *Revista latinoamericana de la papa*, 18(1), 25-76.
25. Rosenzweig, C., Elliott, J., Deryng, D., Ruane, A. C., Müller, C., Arneth, A., Boote, K. J., Folberth, C., Glotter, M., Khabarov, N., Neumann, K., Piontek, F., Pugh, T. A. M., Schmid, E., Stehfest, E., Yang, H. y Jones, J. W. (2014). Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(9), 3268-3273. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222463110>
26. Saavedra, A. K., Delgado, J. A., Botello, R., Mamani, P., & Alwang, J. (2014). A new index to assess nitrogen dynamics in potato (*Solanum tuberosum* L.) production systems of Bolivia. *Agrociencia*, 48(7), 667-678.
27. Saseendran, S. A., Ahuja, L. R., Nielsen, D. C., Trout, T. J. y Ma, L. (2008). Use of crop simulation models to evaluate limited irrigation management options for corn in a semiarid environment. *Water Resources Research*, 44(7), 1-12. <https://doi.org/10.1029/2007WR006181>
28. Steglich, E. M., Osorio, J., Doro, L., Jeong, J. y Williams, J. R. (2018). *Agricultural Policy Environmental Extender Model-User's Manual Version 1501*. Blackland Research and Extension Center.
29. Tito-Velarde, C. y Wanderley, F. (2021). Contribución de la agricultura familiar campesina e indígena a la producción y consumo de alimentos en Bolivia. *Cuadernos de Investigación*, N° 91, CIPCA.
30. Torrico, J. C. (2018). Vulnerabilidad y opciones de adaptación del cultivo papa (*Solanum tuberosum* L.) al cambio climático para condiciones de altiplano. *CienciAgro*, 1, 1–14.

31. Wang, X., Kemanian, A. R. y Williams, J. R. (2015). Special Features of the EPIC and APEX Modeling Package and Procedures for Parameterization, Calibration, Validation, and Applications. En Laj R. Ahuja y Liwang Ma (eds.), *Methods of Introducing System Models into Agricultural Research*, Volume 2, pp. 177-208. <https://doi.org/10.2134/advagricsystmodel2.c6>
32. Wang, X., Williams, J. R., Gassman, P. W., Baffaut, C., Izaurralde, R. C., Jeong, J. y Kiniry, J. R. (2012). EPIC and APEX: Model Use, Calibration, and Validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1447-1462. <https://doi.org/10.13031/2013.42253>
33. Wang, X., Yen, H., Liu, Q. & Liu, J. (2014). An auto-calibration tool for the Agricultural Policy Environmental eXtender (APEX) model. *Transactions of the ASABE*, 57(4), 1087-1098. <https://doi.org/10.13031/trans.57.10601>
34. Wang, Xiuying y Jeong, J. (2016). *APEX-CUTE 4 User Manual N° 4* (Octubre). Texas A&M Agrilife Research.
35. White, J. W., Hoogenboom, G., Kimball, B. A. y Wall, G. W. (2011). Methodologies for simulating impacts of climate change on crop production. *Field Crops Research*, 124(3), 357-368. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.07.001>
36. Williams, J. R., Jones, C. A., Kiniry, J. R. y Spanel, D. A. (1989). EPIC crop growth model. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 32(2), 497-511. <https://doi.org/10.13031/2013.31032>