

Utilización de DSSAT para simular el rendimiento potencial de Maní en la región central de Córdoba

Ricardo Haro¹ y Gustavo Ovando²

¹ Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Estación Experimental Agropecuaria Manfredi, Córdoba (Argentina).

² Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba (Argentina).

Resumen. El crecimiento y desarrollo de un cultivo es determinado por su manejo y por rasgos genéticos que interactúan con factores ambientales. El objetivo de este trabajo fue simular rendimientos potenciales del cultivar de maní ASEM 485 INTA, creciendo en tres fechas de siembra en Argentina, mediante el uso del modelo CROPGRO-Peanut y determinar los coeficientes genéticos del cultivar calibrados a partir de datos de campo de experimentos desarrollados en Argentina entre 2002 y 2006. La calibración del modelo resultó en coeficientes genéticos que produjeron valores simulados para el desarrollo y el crecimiento con rangos del la raíz del error cuadrático medio (RMSE) entre 1,41 – 2,94 días para fenología (subperíodo siembra-R1 y siembra-R5, respectivamente) y, 874; 445,4 y 266,2 kg/ha para peso seco de la parte aérea, peso seco de las vainas y rendimiento, respectivamente; con coeficientes de determinación (R^2) entre 0,82 y 0,99 para todos los rasgos. La estimación precisa de los coeficientes genéticos para la variedad de maní ASEM 485 INTA permite el empleo del modelo CROPGRO-Peanut para tal cultivar en la principal región Manisera de Argentina

Palabras clave: DSSAT, modelo de cultivos, maní, desarrollo, crecimiento, rendimiento potencial

1. Introducción

La siembra de maní en Argentina comprende aproximadamente 300.000 hectáreas (promedio 1995-2015), las cuales se hallan en las regiones centro y sur de Córdoba, este de San Luis y norte de La Pampa, bajo condiciones agroecológicas apropiadas para el crecimiento de este cultivo. El manejo agronómico recomendado en esta región comprende fecha de siembra durante primera quincena de noviembre, densidad de siembra de 14 plantas/m² y distanciamiento entre hileras de 0,7 m.

El rendimiento de maní en Argentina ha incrementado en el transcurso de las décadas [1], pero se manifiestan dos respuestas contrastantes previo y post año 1975 como resultado del cambio de hábito de crecimiento en los genotipos difundidos. No obstante, en el transcurso de los últimos años se ha evidenciado una desaceleración del progreso del rendimiento que, sumada a la dificultad de incrementar la superficie de siembra ante la dominante presencia de otros cultivos (soja y maíz), exige

generación de información tendiente a restablecer aquellas mejoras productivas manifiestas a partir de 1975.

El rendimiento real promedio para el cultivo de maní obtenido en localidades y fechas de siembras habituales es de aproximadamente 3500 kg/ha, lo cual sugiere que el rendimiento potencial, aquel logrado por un genotipo adaptado y cultivado en condiciones favorables sin limitaciones de agua, nutrientes, plagas, ni enfermedades [2], debería ser significativamente mayor. Cuando la temperatura y las condiciones hídricas no son limitantes, una de las estrategias de manejo para incrementar el rendimiento involucra el adelanto de la fecha de siembra respecto de aquella recomendada para la primera quince de noviembre en la región central de Argentina [3]. Un escenario opuesto se manifiesta ante retrasos de la fecha de siembra, pues el cultivo explora condiciones fototermales desfavorables que se traducen en la disminución en la producción de biomasa y en el rendimiento. Estas evidencias y aquellas relacionadas con la evolución del rendimiento a través de las décadas son resultados de diversos estudios llevados a cabo en la principal región manisera de Argentina, donde el objetivo principal fue identificar respuestas relacionadas al crecimiento y al rendimiento de esta especie, bajo riego [1], [3], [4]. En ese contexto, el monitoreo de los cultivos agrícolas durante su ciclo de crecimiento puede proveer información para realizar predicciones del rendimiento con bastante antelación al momento de cosecha. Esto es importante para la toma de decisiones en distintos niveles, tanto para actividades logísticas como para actividades comerciales [5], [6], [7]. Tal información frecuentemente proviene de modelos de cultivos que simulan los procesos biofísicos en el sistema suelo-planta-atmósfera, proveyendo una descripción continua del crecimiento y desarrollo del cultivo. Existen diversas ópticas para el modelado de cultivos en función de los distintos objetivos, disponibilidad de datos y experiencia profesional de los investigadores [8]. Dichos objetivos pueden consistir en (i) suministrar información básica para la planificación y la toma de decisiones por parte de los productores, (ii) evaluar riesgos productivos en función de variables climáticas, (iii) determinar la brecha entre el rendimiento potencial y real de una región a través de un amplio rango de condiciones ambientales, (iv) identificar prácticas de manejo más adecuadas (e.g. fechas de siembra) que incrementen el rendimiento [9], [10] y, (v) ayudar a los científicos a definir las prioridades de investigación [11].

Habitualmente, uno de los principales objetivos por el cual se emplean los modelos de simulación de cultivos es estimar la producción agrícola como una función dependiente de las condiciones meteorológicas, edáficas y del manejo del cultivo [12]. Otro uso en constante crecimiento es en el mejoramiento de los cultivos como herramienta complementaria al mejoramiento genético *per se* [13], [14].

Los modelos mecanísticos simulan periódicamente el crecimiento y desarrollo de los cultivos mediante flujos y balances de carbón, nitrógeno, agua y de energía entre los diversos componentes, y finalmente estiman el rendimiento en el momento de maduración del cultivo [8], [15], [16]. Estos modelos son altamente complejos y resultan difíciles de documentar y mantener. Para salvar estos inconvenientes, los expertos en modelización de cultivos han adoptado estructuras modulares [17]. El paquete de modelos DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology*

Transfer) es un programa de computación que predice el rendimiento y uso de agua de un cultivo como una función de manejo cultural y, de las condiciones edáficas y meteorológicas [18]. En este sentido, CROPGRO-Peanut es uno de los modelos de cultivo que contempla un sistema cuyo objetivo consiste en respaldar decisiones inherentes a la transferencia de tecnología agrícola [19], [20] y, mediante fundamentos fisiológicos simula la productividad del cultivo de maní bajo condiciones ambientales y prácticas de manejo [21], [22]. Estos rasgos hacen a este modelo una herramienta atractiva tanto para el manejo y mejoramiento del cultivo, como así también para el desarrollo de líneas de investigación. Sin embargo, las aplicaciones del modelo CROPGRO-Peanut requieren no sólo información de suelo, clima, prácticas de manejo y fechas de siembra, también exigen información sobre coeficientes genéticos específicos de cada cultivar [23]. Estos coeficientes definen el desarrollo y su crecimiento vegetativo-reproductivo del cultivar [24], [25]. Por ende, estimar los coeficientes genéticos de los genotipos es el primer paso para el uso del modelo CROPGRO-Peanut [26].

Considerando que el uso de modelos es una herramienta preciada para la toma de decisiones en el cultivo de maní y ante la ausencia de evidencias sobre la calibración y validación del modelo CROPGRO-Peanut en la principal región manisera de Argentina, nuestro primer objetivo fue calibrar los coeficientes genéticos de la variedad ASEM 485 INTA del modelo CROPGRO-Peanut, para luego estimar el rendimiento del cultivo ante condiciones potenciales en la región central de Córdoba, Argentina.

2. Materiales y métodos

2.1. Prácticas de manejo del cultivo y diseño experimental

Los experimentos se realizaron a campo durante los años 2002 y 2006 en la Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Manfredi perteneciente al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Se empleó el cultivar ASEM 485 INTA y las fechas de siembra fueron 17 de Octubre y 29 de Noviembre (año 2002), y 14 de Noviembre (año 2006). El cultivo fue sembrado manualmente a una distancia entre hileras de plantas de 0,7 m y a una densidad de siembra de 10 plantas/m lineal (i.e. 14 plantas/m²). Las parcelas dispusieron de riego por goteo para mantener la disponibilidad de agua próxima a capacidad de campo hasta el metro de profundidad de suelo, durante todo el ciclo de crecimiento. Los experimentos se desarrollaron sobre un suelo Haplustol Típico (USDA Soil Taxonomy). Las parcelas experimentales fueron mantenidas libres de malezas mediante su remoción manual y se realizaron aplicaciones periódicas de fungicida para prevención de enfermedades foliares.

2.2. Mediciones a campo

La temperatura media diaria del aire y la radiación solar total incidente se registraron en la estación meteorológica de la EEA Manfredi-INTA. La fenología del cultivo fue evaluada regularmente (ca. cada 10 días) en cada parcela sobre tres plantas marcadas a partir de R1 (primera flor visible en al menos el 50% de las plantas) y según la escala establecida para esta especie [27]. En cada experimento, el cultivar ASEM 485 INTA dispuso de cuatro repeticiones (i.e. unidades experimentales) cuyo tamaño de cada una de ellas fue de cuatro metros de ancho por cinco metros de largo.

Los muestreos de biomasa comenzaron en el estado R1 y continuaron periódicamente (ca. cada 15 días) hasta cosecha (R8). En cada fecha de muestreo se cosecharon plantas de los dos surcos centrales sobre una superficie de 0,35 m². Las plantas fueron separadas en hojas y tallo (biomasa vegetativa), y vainas (biomasa reproductiva). El índice de área foliar (IAF) se determinó mediante medición del área de las hojas obtenidas de cada fecha de muestreo y para ello se empleó un medidor de área foliar LiCor LI-3100. Luego, los componentes vegetativos y reproductivos fueron secados a 70°C hasta peso constante. A R8, las vainas y los granos fueron pesados para la determinación del rendimiento.

2.3. Modelo DSSAT

En el presente trabajo se utilizó el modelo CSM-CROPGRO-Peanut, del paquete DSSAT versión 4.5 [18] para simular fenología, crecimiento, y por último el rendimiento de maní de la variedad ASEM 485 INTA cultivado en condiciones potenciales. Se tomaron como base los valores de los coeficientes genéticos de la variedad MARC I, que ya se encuentran incorporados en el archivo de coeficientes genéticos de maní en DSSAT V 4.5.

En una primera etapa, a los efectos de calibración, se modificaron los valores de los coeficientes genéticos que se detallan a continuación y que afectan principalmente a la fenología del cultivo (Tabla 1).

Tabla 1. Coeficientes genéticos para diversos subperiodos fenológicos del ciclo del cultivar ASEM 485 INTA.

Coeficiente Genético	Definición
EM-FL	Tiempo (Días fototermales) entre la emergencia de la planta y primera flor (R1).
FL-SH	Tiempo (Días fototermales) entre primera flor y primera vaina (R3).
FL-SD	Tiempo (Días fototermales) entre primera flor y primera semilla (R5).
SD-PM	Tiempo (Días fototermales) entre primera semilla y madurez fisiológica (R7)

Una vez ajustado los valores estimados con los observados de fenología, se comenzó a interactuar con los coeficientes genéticos responsables del crecimiento foliar y la fotosíntesis (Tabla 2).

Tabla 2. Coeficientes genéticos para crecimiento foliar y fotosíntesis correspondientes al cultivar ASEM 485 INTA.

Coefficiente Genético	Definición
FL-LF	Tiempo (Días fototermales) entre primera flor y fin de la expansión foliar.
LFMAX	Tasa máxima de fotosíntesis de la hoja (mg CO ₂ m ⁻² s ⁻¹) a 30 °C, 350 ppm CO ₂ , y sin limitaciones por radiación.
SLAVR	Área foliar específica de la variedad (cm ² g ⁻¹)
SIZLF	Tamaño máximo de la hoja (suma de los tres folíolos)(cm ²)

Cuando se logró el ajuste deseado entre el peso seco de hojas y el índice de área foliar, se procedió a modificar los coeficientes genéticos asociados con la partición y el llenado de grano (Tabla 3).

Tabla 3. Coeficientes genéticos de maní, correspondientes al cultivar ASEM 485 INTA, relacionados a la determinación del número de semillas por vaina, al peso de la semilla y su composición de aceite.

Coefficiente Genético	Definición
WTPSD	Peso máximo de cada semilla (g)
SFDUR	Duración del llenado de las semilla para cada cohorte de vainas (Días fototermales).
SDPDV	Número promedio de semillas por vaina.
PODUR	Tiempo (Días fototermales) requerido por la variedad para completar el llenado de la vaina bajo condiciones óptimas.
SDLIP	Fracción de aceite en las semillas (g(aceite)/g(semilla))

La bondad de la calibración fue evaluada mediante el análisis de gráficos estimado/observado y de la evolución de las distintas variables observadas y su comparación con los valores estimado por el modelo. Además se emplearon los estadísticos: coeficiente de determinación (R^2), el error absoluto medio (MAE), la raíz del error cuadrático medio (RMSE), la raíz del error cuadrático medio normalizado por el promedio de los valores observados (RMSE%) y el error promedio (MBE) cuyas fórmulas se detallan a continuación:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (1)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - E_i|}{n} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$RMSE\% = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{n}}}{\bar{O}} \cdot 100 \quad (4)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)}{n} \quad (5)$$

Donde O_i indica el valor de la variable observada para el caso i , E_i es variable estimada por el modelo, n es el número de pares de datos y \bar{O} es el promedio de los valores observados.

3. Resultados y discusión

Los modelos de cultivos están disponibles para los cultivos económicos más importantes y en muchas ocasiones ellos fueron usados exitosamente en diversas áreas de investigación [28], [29]. Por ejemplo, el CROPGRO-Peanut fue evaluado extensivamente a través de datos experimentales sobre cultivares y densidades de siembra obtenidos en USA [30], India [31], [32], [33], Ghana [34] y Tailandia [35] [36] [37], pero no en Argentina. Antes que el CROPGRO pueda ser empleado como una herramienta sobre la toma de decisiones para asistir al manejo de sistemas agrícolas, es necesario determinar los coeficientes del cultivar. En este sentido, estos coeficientes son caracteres del cultivo que definen el desarrollo, crecimiento vegetativo y crecimiento reproductivo de un genotipo. Por lo tanto la estimación precisa de los coeficientes genéticos para genotipos que no cuentan con esta información es un importante primer paso para poder utilizar el modelo CROPGRO-Peanut [24] [38].

3.1. Fenología

Los valores de coeficientes genéticos del cultivar de maní ASEM 485 INTA que modifican la fenología de la simulación del modelo CROPGRO-Peanut se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Valores de coeficientes genéticos correspondientes al cultivar de maní ASEM 485 INTA que modifican la fenología del modelo CROPGRO-Peanut.

EM-FL	FL-SH	FL-SD	SD-PM
22,0	12,0	20,5	40,0

Los resultados de la calibración del modelo indican que el modelo predijo razonablemente bien la mayoría de los estados fenológicos (Fig. 1).

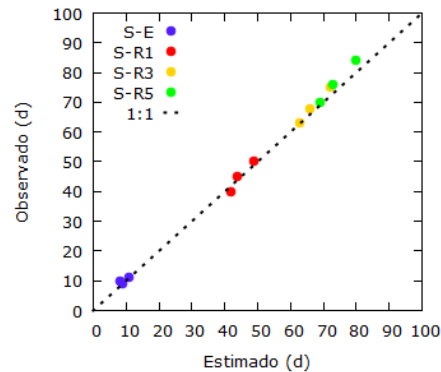


Figura 1. Valores observados y estimados por medio del modelo CROPGRO-Peanut, de los días desde la siembra a emergencia (S-E), siembra a R1 (S-R1), siembra a R3 (S-R3) y siembra a R5 (S-R5), correspondientes al cultivar de maní ASEM 485 INTA.

Se obtuvo similitud entre los valores observados y estimados por el modelo para los estados de desarrollo emergencia, R1 (inicio de floración), R3 (inicio de crecimiento de vainas) y R5 (inicio de crecimiento de granos) (Fig. 1). Se encontró una buena concordancia entre los valores observados y simulados (Tabla 5) para los días desde siembra (DDS) a R1, R3 y R5 como lo indican los elevados valores de R^2 (0,94; 0,99 y 0,99, respectivamente) y bajos valores de RMSE (1,41; 2,08 y 2,94 días, respectivamente) y de RMSE% (3,14; 3,03 y 3,84, respectivamente).

Valores similares de RMSE fueron presentados ante la calibración del modelo CROPGRO-Peanut, sobre 17 variedades en dos estaciones de crecimiento contrastantes en Tailandia [35] y sobre 13 cultivares de maní [29]. Por otra parte, la literatura expone evidencias respecto de estimaciones de los días desde siembra a R1, R3 y R5 para dos variedades de maní creciendo en India, con valores de MAE, MBE y RMSE de 1,6; 1,7 y 2,29 para S-R1; de 3,37; -0,97 y 3,75 para S-R3 y 7,45; -7,52 y 8,83 para S-R5, respectivamente [39]. En nuestro trabajo, los errores promedio también indican subestimaciones para S-R3 y S-R5 (MBE -1,67 y -2,67, respectivamente).

Tabla 5. Estadísticos entre valores estimados por medio del modelo CROPGRO-Peanut y observados de fenología correspondientes al cultivar de maní ASEM 485 INTA.

Estadístico	Siembra a	Siembra a	Siembra a
	R1	R3	R5
R ²	0,94	0,99	0,99
MAE	1,33	1,67	2,67
RMSE	1,41	2,08	2,94
RMSE%	3,14	3,03	3,84
MBE	0	-1,67	-2,67

3.2. Índice de área foliar

Los valores de coeficientes genéticos del cultivar de maní ASEM 485 INTA que modifican el IAF y la fotosíntesis estimada de la simulación del modelo CROPGRO-Peanut se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Valores de coeficientes genéticos correspondientes al cultivar de maní ASEM 485 INTA que modifican el índice de área foliar y la tasa de fotosíntesis.

FL-LF	LFMAX	SLAVR	SIZLF
70,0	1,23	320	17,0

Los valores de IAF estimados para los estados R3 y R5 fueron levemente mayores a aquellos observados (IAFs calculados en base a datos obtenidos en campo) (Figura 2). En el estado R3 (75 DDS), los valores de IAF observado y estimado con siembra del 17-Oct fueron 4,5 y 4,5, respectivamente, implicando una sobreestimación del modelo de 0.6%. Con siembra del 29-Nov, la sobreestimación del modelo a los 63 DDS (R3) fue de 21%, con valores observado y estimado de 3,8 y 4,63, respectivamente. Tal aumento de la sobreestimación es atribuible a la abundante pérdida de hojas, determinada por una marcada senescencia del cultivo propia ante el retraso de la fecha de siembra, sumada a la incidencia de enfermedades foliares como la viruela tardía (*Cercosporidium personatum*). Similares tendencias de sobreestimación se determinaron en R5. En este estado, los valores observado y estimado en siembra 17-Oct (84 DDS) fueron 5,1 y 5,7, respectivamente; implicando una sobreestimación de 12%. Igual sobreestimación se evidenció el 29-Nov (70 DDS), donde el valor de IAF observado y estimado fue 5,0 y 5,6, respectivamente. En otro estudio [35] se determinaron tendencias similares a las nuestras, concluyendo sobreestimaciones de los valores de IAF a partir del estado R6 y hasta madurez comercial, las cuales fueron atribuidas a las pérdidas de hojas por enfermedades foliares. El 14-Nov no se dispuso de datos observados, pero los valores de IAF estimados por el modelo fueron 4,6 y 5,7 para R3 y R5, respectivamente.

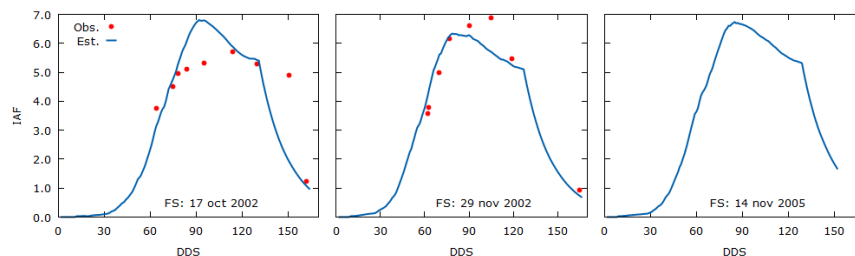


Figura 2. Valores observados (símbolos) y estimados (líneas) del índice de área foliar correspondientes al cultivar de maní ASEM 485 INTA creciendo en tres fechas de siembra (FS).

Los estadísticos calculados a partir de los valores observados y simulados de IAF (Tabla 7) muestran valores R^2 de 0,83 y de RMSE de 0,88; representando en porcentaje un 21,5%. En otro estudio para dos cultivares de maní, se determinaron sobreestimaciones de IAF con valores de RMSE% entre 53 y 71% [40], convirtiéndose en valores levemente inferiores al del presente estudio.

Tabla 7. Estadísticos entre valores estimados y observados de índice de área foliar (IAF), peso seco de la parte aérea (CWAD, en kg/ha), peso seco de vainas (PWAD, en kg/ha) y rendimiento (RTO, en kg/ha) correspondientes al cultivar de maní ASEM 485 INTA.

Estadístico	IAF	CWAD	PWAD	RTO
R^2	0,83	0,96	0,97	0,99
MAE	0,58	649	269	234
RMSE	0,88	874	445	266
RMSE%	21,5	12,8	21,2	5,4
MBE	-0,06	-229	29	154

3.3. Biomasa aérea y Peso de Vainas

Una vez calibrado los valores de coeficientes genéticos que modifican al IAF y la fotosíntesis se procedió a estimar los valores de los coeficientes genéticos que modifican la biomasa, el peso seco de las vainas y el rendimiento (Tabla 8).

Tabla 8. Valores de coeficientes genéticos correspondientes al cultivar de maní ASEM 485 INTA que modifican biomasa aérea el peso seco de las vainas y el rendimiento.

WTSPD	SFDUR	SDPDV	PODUR	SDLIP
0,540	27,0	1,83	13,0	0,533

Las estimaciones de la biomasa total por el modelo CROPGRO-Peanut, a través del ciclo del cultivo y fechas de siembra, presentaron una tendencia sigmoidea al igual que los datos observados a campo (Figura 3). En general, los valores estimados

coincidieron razonablemente bien con los valores observados. Las mayores disparidades se evidenciaron entre los 75 y 100 d del ciclo del cultivo bajo siembra del 29-Nov, donde los valores estimados fueron menores a los observados, y a partir de los 100 días bajo la fecha de siembra del 14-Nov. Analizando estados de desarrollo puntuales se obtuvieron diversas respuestas. En la siembra del 17-Oct y en estado R3 (75 DDS), los valores observado y estimado fueron 4470 y 3897 kg/ha, respectivamente, implicando una subestimación de 13%. Una tendencia contraria se evidenció en la siembra del 29-Nov en R3 (63 DDS), con sobreestimación de 14% como resultante de valores observado y estimado de 3300 y 3943 kg/ha, respectivamente.

En la siembra del 14-Nov en R3 (68 DDS), la biomasa total observada y estimada fue 4670 y 3846 kg/ha, respectivamente, implicando una subestimación de 18%. En R5, los valores observado y estimado con la siembra del 17-Oct (84 DDS) fueron 5970 kg/ha y 5588 kg/ha, respectivamente, implicando una subestimación de 6%. Contrariamente, a siembra del 29-Nov (70 DDS), los valores observado y estimado fueron 5250 y 5089 kg/ha de biomasa total, respectivamente; determinando una sobreestimación del modelo de 3%. Finalmente, en la siembra del 14-Nov (76 DDS), los valores observados y estimados fueron 5820 y 5340 kg/ha, respectivamente, implicando una subestimación del modelo de 8%. A R8, con siembra del 17-Oct y 29-Nov (163 y 165 DDS, respectivamente), la sobreestimación del modelo debió ser consecuencia de la senescencia del cultivo y de la incidencia de la viruela tardía (*Cercosporidium personatum*). Finalmente, los valores observados y estimados en la siembra del 14-Nov (151 DDS) fueron 12610 y 12349 kg/ha, respectivamente, implicando una subestimación del modelo de 2%.

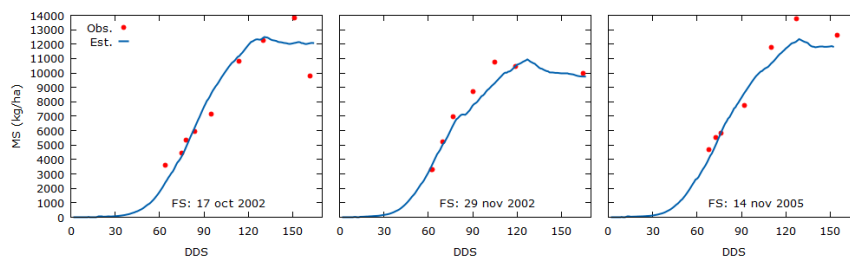


Figura 3. Valores observados (símbolos) y estimados (líneas) de biomasa correspondientes al cultivar de maní ASEM 485 INTA creciendo en tres fechas de siembra (FS).

Los estadísticos para biomasa total presentaron valores de valores R^2 de 0,96 y RMSE de 874 kg/ha (Tabla 7), representando en términos porcentuales 12,8% del promedio de los valores observados. El valor de R^2 del presente estudio fue próximo al valor superior de aquel rango entre 0,55 y 0,85 establecido en USA [29]. Respecto al RMSE, el valor obtenido en este estudio fue estadísticamente similar a aquel valor de 608 kg/ha determinado China [40] y, también se halló contemplado dentro de aquel rango entre 720 y 1320 kg/ha determinado en USA [29].

Similarmente a la producción de biomasa total, se ajustaron funciones de tipo sigmoidea entre la producción de biomasa de vainas y el tiempo (DDS), donde los

valores manifestaron distintos grados de similitud con aquellos observados a campo (Figura 4). Por ejemplo, la dinámica determinada para la fecha de siembra del 17-Oct evidenció un alto grado de similitud respecto de aquella obtenida en base a los valores observados. Menor exactitud en el ajuste entre los datos observados y estimados se expuso a través de la siembra del 29-Nov y 14-Nov. Los valores máximos observados y estimados con la siembra del 17-Oct fueron 6633 y 6973 kg/ha, respectivamente, implicando una sobrestimación del modelo de 5%. Para fecha de siembra 29-Nov, los valores máximos observados y estimados fueron 5899 y 5501 kg/ha, respectivamente, implicando una subestimación del modelo de 7%. Finalmente, para la siembra del 14-Nov los valores máximos observados y estimados fueron 6043 y 6488 kg/ha, respectivamente, implicando una sobrestimación del modelo de 7%. En términos generales el peso de vainas fue simulado de manera adecuada, con un valor de RMSE de 445 kg/ha (Tabla 7). Este valor se halla dentro del rango entre 240 y 480 kg/ha para RMSE determinado previamente [29] y resultó levemente superior al valor determinado por [40] (242-422 kg/ha). El elevado valor de R^2 (0,97) determinado en nuestro estudio fue indicativo de una robusta asociación entre los datos observados y estimados, que resalta de aquel valor máximo de R^2 de 0,87 en un estudio previo [29]. Valores de MAE, MBE y RMSE de 87,5; -30,8 y 136,5, respectivamente, para dos variedades de maní cultivadas en India bajo dos condiciones ambientales diferentes [39] fueron contrastantemente inferiores a los de este estudio.

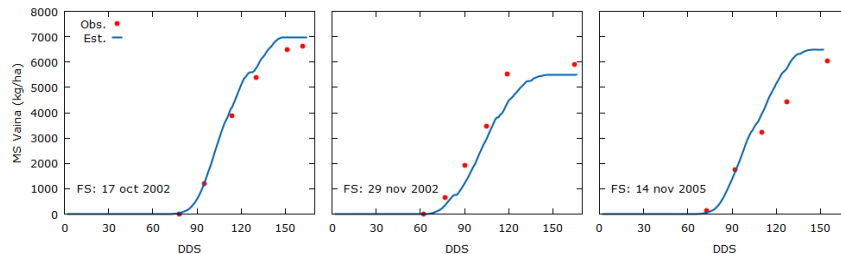


Figura 4. Valores observados (símbolos) y estimados (líneas) de biomasa correspondientes al cultivar de maní ASEM 485 INTA creciendo en tres fechas de siembra (FS).

3.4. Rendimiento

El rendimiento en granos no manifestó un patrón de respuesta definido a través de las fechas de siembra. En siembra del 17-Oct, los valores observado y estimado fueron 5200 y 5611 kg/ha, respectivamente, implicando una sobrestimación del modelo de 8%. Una tendencia contraria se evidenció en la siembra del 29-Nov, donde los valores fueron 4550 y 4430 kg/ha para valores observado y estimado, respectivamente, implicando una subestimación del modelo de 3%. En la siembra del 14-Nov, el rendimiento en granos observado y estimado fue 5040 y 5211 kg/ha, respectivamente, implicando una sobrestimación del 3%.

Esta variable presentó valores de 266 kg/ha y 5,4% para RMSE y RMSE%, respectivamente (Tabla 7). Ambos valores se hallaron dentro de los rangos determinados en un previo estudio [40], donde los RMSE estuvieron entre 207 y 362 kg/ha, y correspondieron a un RMSE% entre 4 y 9%. En otros estudios semejantes al

nuestro se determinaron errores similares. Al respecto, en uno de ellos se halló un valor de RMSE de 252 kg/ha [41], en tanto que en otro se obtuvieron rangos de 200-360 kg/ha para RMSE y, de 0,55-0,85 para R^2 [29].

4. Conclusiones

A través del modelo CROPGRO-Peanut se pudo determinar los coeficientes genéticos para el cultivar de maní ASEM 485 INTA y, consecuentemente, se estimaron el desarrollo, el crecimiento y el rendimiento del cultivar ASEM 485 INTA, con valores simulados similares a sus correspondientes valores observados.

Asimismo, los estadísticos evaluados permitieron determinar la bondad en la calibración del modelo. Por lo tanto, estos resultados permiten incorporar el uso del modelo como herramienta sobre la toma de decisiones en sistemas productivos de maní en Argentina, tanto cuando se evalúan opciones de manejo o las brechas de rendimiento para una situación determinada o en ciertas áreas productivas. Por otra parte, los resultados obtenidos facilitarían, la estimación de coeficientes genéticos de nuevos cultivares.

Referencias

1. Haro, R.J., Baldessari, J., Otegui, M.E. Genetic improvement of peanut in Argentina between 1948 and 2004: seed yield and its components. *Field Crops Res.* 149: 76–83. (2013).
2. Evans, L.T. *Crop evolution, adaptation and yield* Cambridge University Press, New York. (1993).
3. Haro, R.J., Otegui, M.E., Collino, D.J., Dardanelli, J.L. Environmental effects on efficiency and crop growth rate. *Field Crops Res.* 103: 217–228. (2007).
4. Haro, R.J., Baldessari, J., Otegui, M.E. Genetic improvement of peanut in Argentina between 1948 and 2004: links between phenology and grain yield determinants. *Field Crops Res.* 174: 12-19. (2015).
5. Lobell D.B., Asner G.P., Ortiz Monasterio J.I. y Benning T.L. 2003. Remote sensing of regional crop production in the Yaqui Valley, Mexico: estimates and uncertainties. *Agriculture Ecosystems & Environment.* 94: 205-220. (2003).
6. Lobell D.B y Asner G.P. Cropland distributions from temporal unmixing of MODIS data. *Remote sensing of Environment.* 93: 412-422. (2004).
7. Rizzi R. y Rudorff B.F.T. Estimativa da produtividade de soja por meio de um modelo agrometeorológico-espectral: estudo de caso no Rio Grande do Sul. *Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 237-244.*
8. Tharakan P.J., Nowak C.A. y Abrahamson L.P. Modeling Growth and biomass production in willow plantations in the Northesatern and Mid–Atlantic United States. *Bioenergy 2000. Conference Reports.* October 15-19. Buffalo, New York, USA. <http://bioenergy.ornl.gov/papers/bioen00/tharakan.html>.
9. Aggarwal, P.K., Kalra, N. Analyzing the limitation set by climatic factors, genotype, and water and nitrogen availability on productivity of wheat. II. Climatically potential yields and management strategies. *Field Crops Res.* 36: 161–166. (1994).

10. Meinke, H., Hammer, G.L. A peanut simulation model. II. Assessing regional production potential. *Agron. J.* 87: 1093–1099. (1995).
11. Penning de Vries, F., Teng, P., Metselaar, K. (Eds.). 1993. *Systems Approaches for Agricultural Development*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
12. Hoogenboom, G. 2000. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications. *Agricultural and Forest Meteorology*. 103: 137–157. (2000).
13. Spitters, C.J.T., Schapendonk, A.H.C.M. Evaluation of breeding strategies for drought tolerance in potato by means of crop growth simulation. *Plant Soil*. 123: 193–203. (1990).
14. Wortmann, C.S. An adaption breeding strategy for water deficit in bean developed with the application of the DSSAT3 drybean model. *Afr. Crop Sci. J.* 6: 215–225. (1998).
15. Bourdôt, G.W.; Jamieson, P.D.; Hurrell, G.A. Evaluation of a mechanistic model of wheat and weed growth. 52nd Conference Proceedings of The New Zealand Plant Protection Society Incorporated. 52 pp. 203- 208. (1999).
16. Prusinkiewicz, P. Modeling plant growth and development. *Current Opinion in Plant Biology*. 7 (1): 79–83. (2004).
17. Jones, J.W.; Keating, B.A.; Porter, C.H. Approaches to modular model development. *Agricultural Systems*. 70:421–443.(2001).
18. Hoogenboom, G., J.W. Jones, P.W. Wilkens, C.H. Porter, W.D. Batchelor, L.A. Hunt, K.J. Boote, U. Singh, O. Uryasev, W.T. Bowen, A. Gijsman, A. du Toit, J.W. White, and G.Y. Tsuji. 2004. Decision support system for agrotechnology transfer [CD-ROM]. Version 4.0. Univ. of Hawaii, Honolulu.
19. Hoogenboom, G., Wilkens, P.W., Tsuji, G.Y. (Eds.). 1999. *DSSAT Version 3*, vol. 4. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii.
20. Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijsman, A.J., Ritchie, J.T. *DSSAT Cropping System Model*. *Eur. J. Agron.* 18: 235–265. (2003).
21. Boote, K.J., Jones, J.W., Hoogenboom, G., 1998. Simulation of crop growth: CROPGRO MODEL. In: Peart, R.M., Curry, R.B. (Eds.), *Agricultural Systems Modeling and Simulation*. Marcel Dekker, New York, pp. 651–692.
22. Kaur, P., Hundal, S.S. Forecasting growth and yield of groundnut (*Arachis hypogaea*) with a dynamic simulation model PNUTGRO under Punjab conditions. *J. Agric. Sci.* 133: 167–173. (1999).
23. Tsuji, G.Y., Uehara, G., Balas, S. (Eds.). 1994. *DSSAT Version 3*, vols. 1–3. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii.
24. Hunt, L.A., Pararajasingham, S., Jones, J.W., Hoogenboom, G., Imamura, D.T., Ogoshi, R.M. GENCALC: Software to facilitate the use of crop models for analyzing field experiments. *Agron. J.* 85: 1090–1094. (1993).
25. Jintrawet, A., Laohasiriwong, S., Lhairoong, C., Jongkaewwattana, S. 1997. Estimation of sugarcane productivity by sugarcane growth and development (principles & concepts). In: Jintrawet, A., Laohasiriwong, S., Lhairoong, C. (Eds.), *The Report of ThaiCane Development and Verification Model*. Multiple Cropping Centre, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand, pp. 2–15.
26. Banterng, P., Patanothai, A., Pannangpecth, K., Jogloy, S., Hoogenboom, G. Determination and evaluation of genetic coefficients of peanut lines for breeding applications. *Europ. J. Agronomy*. 21: 297-310. (2004).
27. Boote, K.J. Growth stages of peanut (*Arachis hypogaea* L.). *Peanut Sci.* 9: 35-39. (1982).
28. Tsuji, G.Y., Hoogenboom, G., Thornton, P.K. *Understanding Options for Agricultural Production*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands. (1998).
29. Anothai, J., Patanothai, A., Jogloy, S., Pannangpecth, K., Boote, K.J., Hoogenboom, G. A sequential approach for detrmining the cultivar coefficients of peanut lines using ed-of-season data of crop performance trials. *Field crops Res.* 108: 169-178. (2008).

30. Gilbert, R. A., K. J. Boote, and J. M. Bennett. On-farm testing of the PnutGro crop growth model in Florida. *Peanut Sci.* 29: 58–65. (2002).
31. Singh, P., K. J. Boote, and S. M. Virmani: Evaluation of the groundnut model PnutGro for crop response to plant population and row spacing. *Field Crops Res.* 39: 163–170. (1994).
32. Singh, P., K. J. Boote, A. Yogeswara Rao, M. R. Iruthayaraj, A. M. Sheikh, S. S. Hundal, R. S. Narang, and P. Singh. Evaluation of the groundnut model PnutGro for crop response to water availability, sowing dates, and seasons. *Field Crops Res.* 39: 147–162. (1994).
33. Bhatia, V. S., Singh, P., Kesava Rao, A. V. R., Srinivas, K., & Wani, S. P. Analysis of Water Non limiting and Water Limiting Yields and Yield Gaps of Groundnut in India Using CROPGRO Peanut Model. *Journal of Agronomy and Crop Sci.* 195(6): 455-463. (2009).
34. Naab, J. B., P. Singh, K. J. Boote, J. W. Jones, and K. O. Marfo: Using the CROPGRO-peanut model to quantify yield gaps of peanut in the Guinean savanna zone of Ghana. *Agron. J.* 96: 1231–1242. (2004).
35. Suriham, B., A. Patanothai, K. J. Boote, and G. Hoogenboom. Designing a peanut ideotype for a target environment using the CSM-CROPGRO-Peanut model. *Crop Sci.* 51, 1887–1902. (2011).
36. Anothai, J., A. Patanothai, K. Pannangpetch, S. Jogloy, K. J. Boote, and G. Hoogenboom, 2009: Multi-environment evaluation of peanut lines by model simulation with the cultivar coefficients derived from a reduced set of observed field data. *Field Crops Res.* 110: 111–121. (2009).
37. Putto, C., A. Pathanothai, S. Jogloy, K. Pannangpetch, K. J. Boote, and G. Hoogenboom. Determination of efficient test sites for evaluation of peanut breeding lines using the CSM-CROPGRO-peanut model. *Field Crops Res.* 110: 272– 281. (2009).
38. Boote, K.J., Jones, J.W., Batchelor, W.D., Nafziger, E.D., Myers, O. Genetic coefficients in the CROPGRO–Soybean model: links to field performance and genomics. *Agron. J.* 95: 32–51.(2003).
39. Yadav, S., Patel, H., Patel, G., Lunagaria, M., Karande, B., Shah, A., Pandey, V. Calibration and validation of PnutGro (DSSAT v4. 5) model for yield and yield attributing characters of kharif groundnut cultivars in middle Gujarat region. *Journal of Agrometeorology, Special Issue.* 14:24-29. (2012).
40. Guerra, L. C., Hoogenboom, G., y Garcia, A. G., Banterng, P., & Beasley Jr, J. P. 2008. Determination of cultivar coefficients for the CSM-CROPGRO-Peanut model using variety trial data. *Transactions of the ASABE*,51(4), 1471-1481. (2008).
41. Knörzer, H., Graeff-Hönninger, S., & Claupein, W. Model-based Approach to Quantify and Regionalize Peanut Production in the Major Peanut Production Provinces in the People's Republic of China. In Conference: Precision Agriculture Reloaded - Informationsgestützte Landwirtschaft. Referate der 30. GIL Jahrestagung, 24.-25. Februar 2010, Stuttgart (pp. 101-104).