

Modelos de Simulación para Cereales Forrajeros en el Sur de Nuevo León, México

Misael Rodríguez Arvizu^{1*}, Heriberto Díaz Solís¹, Eduardo Aizpuru García², Ramiro López Trujillo³, Víctor Manuel Zamora Villa⁴

¹Departamento de Recursos Naturales Renovables, ³Departamento de Nutrición y alimentos, ³Departamento de Fitomejoramiento, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Calzada Antonio Narro 1923, Col. Buensvista C.P. 25315. Saltillo, Coahuila, México. Tel. (844) 411-0377 y 78 Fax (844) 411-0236. E-mail: misa983@hotmail.com (*Autor responsable).

Abstract

The use of simulation models in agriculture is an alternative in the decision making process, in order to lower the researching costs, and to help reducing economic and production risks, since they summarize interactions among the factors of a productive process. In fodder cultures they are a tool useful to predict the behavior of both, growth and yield, and to help understanding the physiological plant-atmosphere relations. This work was performed with the aim of calibrating the DSSAT 4.0.2.0 software for barley, wheat and triticale cultures in the South of the Mexican state of Nuevo León. The field experiment was established in the experimental station of Navidad, in Galeana, N. L., Mexico, belonging to the Autonomous Agrarian University Antonio Narro (UAAAN). The genetic materials to be evaluated were: NARRO-92-05 barley (*Hordeum vulgare*), AN-239 wheat (*Triticum aestivum*), and AN-125, and AN-31-B Eronga triticale (*X:Triticosecale Wittmack*) under a completely randomized block design. The sowing took place in the spring-summer cycles 2007 and 2008. Program DSSAT 4.0.2.0 was parameterized within each of its modules and later on it was calibrated by the manipulation of genetic coefficients. The calibration and validation of the barley, wheat, and triticale models in the DSSAT 4.0.2.0 software for the genotypes and region of study, were performed satisfactorily, and the models had the capacity to simulate values with a good level of precision, when compared to the observed ones. It may, so, be concluded that, the usage of simulation models of DSSAT 4.0.2.0 software, is suitable to predict growth and yield of fodder cultures.

Key Words: prediction, calibration, barley, wheat, triticale, DSSAT.

Resumen

El uso de modelos de simulación en la agricultura es una alternativa en la toma de decisiones para reducir los costos de investigación, y ayudar a reducir los riesgos económicos, y de producción ya que resumen la interacción entre los factores de un proceso productivo. En cultivos forrajeros son una herramienta para predecir los comportamientos de crecimiento y rendimiento, y ayudan a entender las relaciones fisiológicas planta-ambiente. Este trabajo se realizó con el objeto de calibrar el programa DSSAT 4.0.2.0 para los cultivos de cebada, trigo y triticale en el sur del estado de Nuevo León, México. El experimento de campo fue establecido en el Centro Agrícola Experimental de Navidad, Galeana, N. L., México, de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Los materiales genéticos utilizados fueron: cebada NARRO-92-05 (*Hordeum vulgare*), trigo AN-239 (*Triticum aestivum*), y triticale (Eronga, AN-125, y AN-31-B (*X:Triticosecale wittmack*) establecidos en un diseño de bloques al azar. La siembras se efectuaron en los ciclos primavera verano 2007 y 2008. El programa DSSAT 4.0.2.0 fue parametrizado dentro de cada uno de sus módulos y posteriormente se calibró mediante la manipulación de coeficientes genéticos. La calibración y validación de los modelos de cebada, trigo, y triticales en el programa DSSAT 4.0.2.0 para los genotipos y región de estudio, se realizaron satisfactoriamente, y los modelos tuvieron la capacidad de simular valores con buen nivel de precisión, al comparar con valores observados. Se concluye que, mediante el uso de modelos de simulación de DSSAT 4.0.2.0, es factible predecir el crecimiento y rendimiento de cultivos forrajeros.

Palabras clave: predicción, calibración, cebada, trigo, triticale, DSSAT.

Introducción

La simulación en sistemas agrícolas, ha surgido como una herramienta que en base a la integración de sus componentes permite hacer una representación real de los mismos (Odum y Odum, 2000) por medio de operaciones lógicas y aritméticas que representan la estructura (estado) y comportamiento (cambio de estado) del sistema de interés (Grant *et al.*, 1997). Partiendo de lo anterior se han creado un gran número de programas como DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer; www.icasa.net) para simular, o predecir, el desarrollo y producción de un cultivo en base a información genotípica, ambiental y de manejo proporcionada por el usuario. DSSAT es un programa creado como una herramienta de apoyo para la toma de decisiones en la transferencia de agrotecnología desde el año de 1982 (Uehara y Tsuji, 1998). La toma de decisiones en el área agrícola, como en cualquier proceso productivo, es fundamental para alcanzar un objetivo. Por lo tanto, el contar con herramientas que permitan seguir la ruta más acertada para el uso y aprovechamiento sustentable de los recursos disponibles es una necesidad, sobre todo ante los cambios e inestabilidad climática actual. El objetivo de este trabajo fue calibrar y validar los modelos cebada, trigo, y triticale del programa DSSAT 4.0.2.0 para el Sur de Nuevo León, México.

Materiales y Métodos

Se sembraron y muestrearon dos ciclos de cultivo: primavera-verano 2007 y primavera-verano 2008, de los cultivos de trigo, cebada y triticale, en el campo Agrícola Experimental de Navidad, de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, localizado en Galeana, Nuevo León. El campo esta situado en los 25° 02' 19" N y 100° 37' 29" O, a una altitud de 1985 m.

Se trabajó con los cultivos de cebada (*Hordeum vulgare*), trigo (*Triticum aestivum*), y triticale (*X:Triticosecale* Wittmack). Se sembró un genotipo de cebada (NARRO-95-02), un genotipo de trigo (AN-239), y tres genotipos de triticale (Eronga), (AN-125) y (AN-31-B), en el ciclo primavera-verano 2007, la siembra se efectuó el día 7 de marzo (día juliano 66). La siembra en el 2008 se efectuó el día 22 de febrero (día juliano 53) con cebada (NARRO-92-05), trigo (AN-239), y triticale (AN-31-B). La dosis de fertilización en el ciclo 2007 fue 85-117-00 (N-P-K) con las fuentes fosfato monoamónico, y sulfato de amonio; y para el ciclo 2008 la dosis fue de 60-60-60 con la fuente triple 17. Las dos siembras se realizaron con una sembradora de cereales de grano pequeño, a una densidad de 140 kg ha⁻¹. Antes de las siembras se preparó previamente el terreno, con subsoleo,

rastra y riego.

El arreglo de los experimentos se estableció como bloques al azar, con tres repeticiones, las unidades experimentales fueron de 4.32 m de ancho por 20 m de largo, es decir con una superficie de (86.4 m²) cada una, con un espacio entre parcelas de 1 m.

Los datos climáticos se registraron diariamente por medio de una estación automática (Davis Vantage Pro II) instalada en el sitio del experimento. Los registros se hicieron en intervalos de 30 min, y los datos se descargaron cada semana. La base de datos se procesó en una hoja de cálculo de Excel y se obtuvieron temperaturas máximas y mínimas por día, en grados centígrados, radiación acumulada por día en W m⁻² (unidad de energía) y la precipitación en mm. La estación climatológica registró la radiación solar en W m⁻² y DSSAT 4.0.2.0 que requiere expresar la radiación en MJ m⁻² día⁻¹ (unidad de potencia). Por definición un W es igual a un J s⁻¹ y un MJ es igual a un millón de joules. Como los registros se hicieron cada 30 min se tuvieron 48 valores de radiación en W m⁻² durante el día. Entonces se obtuvo el promedio en W m⁻² s⁻¹. El valor acumulado en el día fue el promedio multiplicado por 86,400 segundos que tiene un día y se obtuvo el resultado en J m⁻² día⁻¹ que dividido entre 1,000,000 es igual a MJ m⁻² día⁻¹.

En los cultivos se muestreó la emergencia en la primera semana, para obtener la densidad de plantas; para esto se contó el número de plantas emergidas en cinco líneas de 50 cm, seleccionadas al azar por medio de un escantillón de madera de 50 cm dentro de cada una de las unidades experimentales. Al final del ciclo para obtener la densidad de tallos, se contó el número de vástagos en cinco líneas de 50 cm seleccionadas de la misma forma que los muestreos de emergencia en cada unidad experimental.

Para acumulación de biomasa, y componentes del rendimiento, semanalmente se cortaron 5 plantas seleccionadas al azar caminando en zigzag sobre la parcela y, al agacharse, se cortó la planta que quedaba más cerca, después se llevaron a la estufa de ventilación forzada a una temperatura de 65 °C por 72 h para secar y posteriormente separar manualmente tallos de espigas, y pesar cada una de las muestras, todo esto desde la primera semana hasta la madurez fisiológica de cada uno de los cultivos. Para estimar el rendimiento por hectárea se usó el peso de dichas plantas, extrapolado en base a los muestreos de densidad de población realizados al principio y al final del cultivo.

Para los modelos de simulación en el programa DSSAT es básica la información de manejo del cultivo (fecha de

siembra, fecha de emergencia, espacio entre surcos, densidad de población, cantidad y tiempo de fertilización y la aplicación del riego) y también se requiere información de las condiciones ambientales del suelo, temperatura, radiación y precipitación (Hunt y Boote, 1998).

Se crearon bases de datos dentro del programa DSSAT en los módulos correspondientes (suelo, clima, datos experimentales, y manejo del cultivo), y se agregaron los genotipos utilizados.

Suelo (Soil Data). Se creó el archivo de características del suelo en el módulo "Sbuild" donde se registró la ubicación geográfica, el color del suelo, el drenaje superficial así como la pendiente en por ciento. La información del suelo se hizo por capas de 30 cm hasta los 120 cm registrando textura en porcentaje de arena, limo y arcilla, porcentaje de materia orgánica, pH, y nitrógeno total en por ciento.

Clima (Weather Data). Dentro del módulo *WeatherMan* se creó el archivo de clima (WTH) con información como ubicación geográfica, temperaturas máximas y mínimas diarias en grados centígrados, radiación solar en MJ m⁻² día⁻¹ y precipitación en mm.

Datos experimentales (Experimental Data). En este módulo ATCreate se cargaron los datos observados durante el ciclo de cultivo de cada uno de los materiales genéticos utilizados. Se crearon dos archivos: el archivo A (rendimiento máximo, fecha de anthesis, número de espigas por metro cuadrado) y el archivo T (datos experimentales semanales).

Datos de manejo del cultivo (Crop Management Data). Con el módulo *Xbuild* se generó el archivo de manejo del cultivo, donde se cargó la información general del experimento como método de siembra, densidad de siembra, densidad de población emergida, espacio entre surcos, variedades utilizadas, estación climática, suelo, profundidad de siembra, para cada uno de los cultivos, y variedades.

La versión 4.0.2.0 de DSSAT aun no cuenta con bases de datos para el cultivo de triticale, así que la calibración se hizo utilizando coeficientes genéticos de trigo, ya que tienen patrones de crecimiento similares.

La carga de los genotipos utilizados en la calibración de DSSAT 4.0.2.0 se realizó en el archivo .CUL en el cual se agregaron las variedades de cada uno de los cultivos estudiados. Se utilizaron como coeficientes genéticos iniciales, los valores de las variedades más semejantes a los materiales trabajados.

Con la información obtenida del ciclo 2007 se calibró DSSAT para cada uno de los cultivos, después de que el

programa estaba operando con los archivos creados, la calibración se llevó a cabo mediante la manipulación de los coeficientes genéticos: P1V, P1D, P5, G1, G2, G3 y PHINT, los cuales se describen al pie del Cuadro 1. Los criterios para evaluar la calibración fueron: minimizar la raíz cuadrada del cuadrado medio del error {RMSE= [Ó (simulado-observado)²/N]^{0.5}} que cuantifica la dispersión o variación entre los valores simulados con los observados, y el coeficiente de determinación (r²) que es una medida del grado de asociación entre los datos simulados y los observados (Gijsman *et al.*, 2002).

La validación de los modelos se realizó con la información del ciclo 2008 utilizando los coeficientes genéticos encontrados en la calibración.

Resultados y Discusión

Calibración

El proceso de calibración realizado mediante la manipulación de coeficientes genéticos, indicó que existen hábitos de crecimiento ciertamente diferentes entre los cultivos de cebada, trigo, y triticales, únicamente se observan similitudes entre el trigo (AN-239) y el triticale (AN-125) como se puede apreciar en los coeficientes genéticos de cada uno de los materiales genéticos evaluados (Cuadro 1), en éste se puede apreciar de forma cuantitativa la descripción de cada uno de los materiales, por ejemplo, los materiales que necesitan vernalización como el triticale (AN-31-B) que necesitan aproximadamente 15 d con temperatura óptima para completar la vernalización, en su ciclo de cultivo; caso contrario de la cebada (NARRO-92-05) y el triticale (Eronga) que no tiene esta característica, esto quiere decir que la tasa de acumulación de biomasa en el triticale (AN-31-B) es retardada antes de acumular los días necesarios para la vernalización y en la cebada (NARRO-92-05) y triticale (Eronga) la acumulación de biomasa es más consistente.

Los materiales utilizados en este estudio mostraron sensibilidad al fotoperiodo, este es un factor que define la iniciación floral (Hogenboom *et al.*, 2003) y por tanto el inicio de llenado de grano, el triticale AN-125 fue el que tuvo mayor porcentaje de reducción en la tasa de desarrollo (75 %). En cuanto a la fase de llenado de grano se observó que la cebada (NARRO-92-05) fue precoz ya que lo que requirió fueron 350 GDD mientras que el triticale AN-31-B necesitó 750 GDD; esto coincidió con lo tardío que se mostró el ciclo de cultivo del mismo. El PHINT o filocrono demostró que el ciclo de cultivo de la cebada fue el más corto de los materiales utilizados, esto se deduce de los 65 GDD que hay entre la aparición de cada una de sus hojas.

Cuadro 1. Coeficientes genéticos encontrados para los cultivos y variedades utilizadas en la calibración.

Cultivo y Variedad	Coeficiente genético						
	PIV*	PID*	P5*	G1*	G2*	G3*	PHINT*
Cebada (NARRO-92-05)	0	60	350	22	34	0.9	65
Trigo (AN-239)	05	50	550	28	30	1.0	70
Triticale (ERONGA)	00	65	650	25	42	1.4	75
Triticale (AN-125)	05	75	450	28	32	1.0	70
Triticale (AN-31-B)	15	70	750	21	41	1.7	80

* PIV = días con temperatura óptima para vernalización; PID = porcentaje de reducción en la tasa de desarrollo con un fotoperiodo 10 hr menor al umbral; P5 = tiempo térmico de la fase de llenado de grano (°C día); G1 = número de semillas por unidad de peso del dosel en la antesis (#/g); G2 = tamaño normal de la semilla bajo condiciones óptimas (mg); G3 = peso seco normal (total, incluyendo grano) de un solo vástago no estresado en la madurez (g); PHINT = tiempo térmico entre la aparición sucesiva de las hojas (°C día).

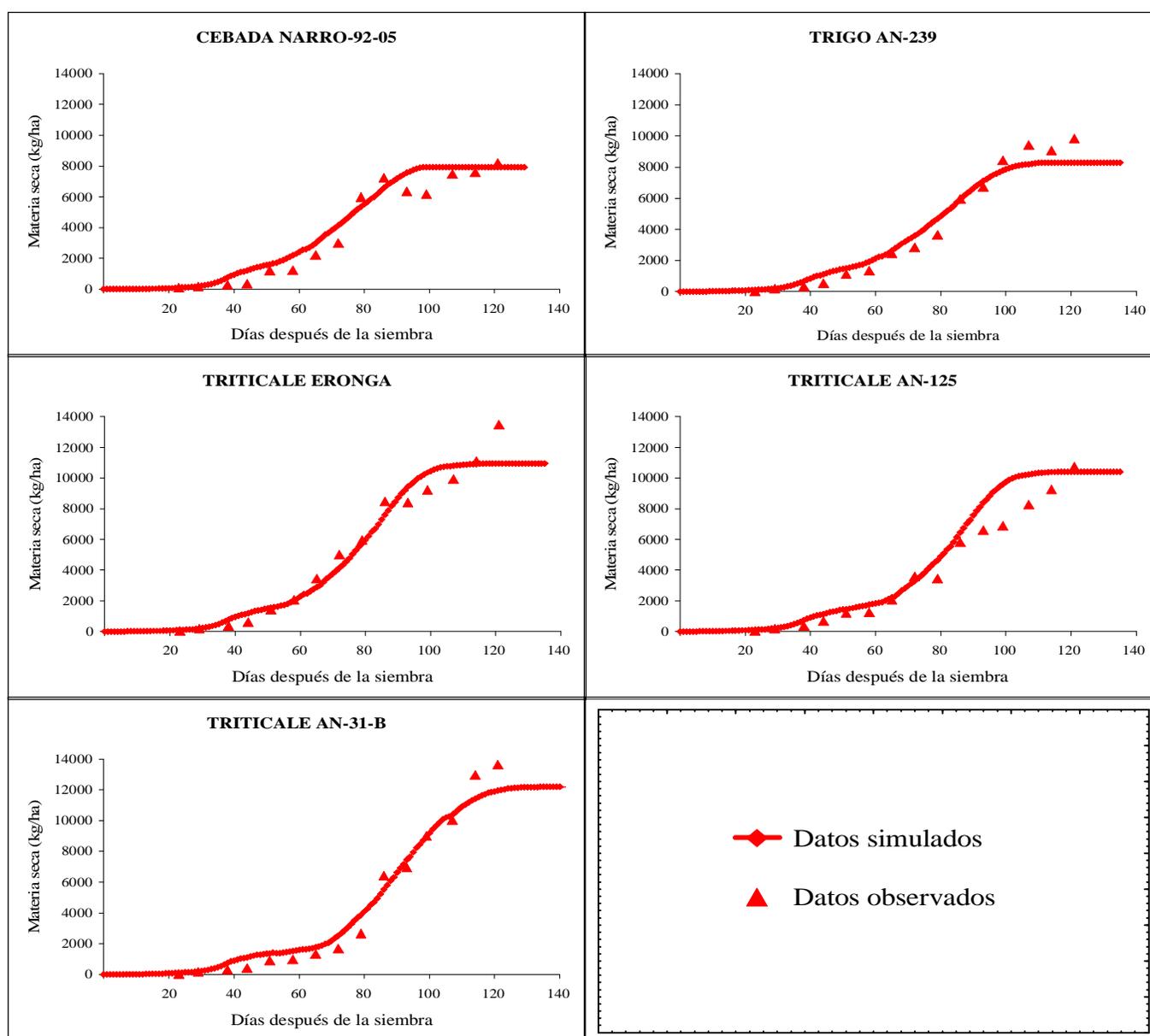


Figura 1. Acumulación de materia seca aérea, parcial durante el ciclo de cultivo en cebada, trigo y triticale, simulados por DSSAT 4.0.2.0.

Acumulación de materia seca parcial aérea

La acumulación de materia seca en los cultivos estudiados mostró distintas tasas de crecimiento como se puede apreciar en la Figura 1. La cebada tuvo rápido crecimiento desde el inicio del ciclo, comparado con los demás materiales y finalizó su crecimiento aproximadamente a los 90 días después de la siembra con un rendimiento aproximado de 9,000 kg ha⁻¹, por otra parte el triticale (AN-31-B) presentó lento crecimiento en la primer etapa de desarrollo lo que indica que necesita días de vernalización para iniciar el amacollamiento (Ewert *et al.*, 1996) y la finalización de su ciclo fue aproximadamente a los 120 días, después de la siembra, con un rendimiento aproximado de 12,500 kg ha⁻¹.

Los indicadores estadísticos de la calibración que se

obtuvieron fueron r^2 de 0.95 para la cebada (NARRO-92-05) y RMSE de 808.1 kg ha⁻¹. Para el trigo (AN-239) se obtuvo una r^2 de 0.97, la cual supera el valor de 0.63 encontrado por Rodríguez *et al.* (1990) al usar CERES-trigo en la simulación de crecimiento de forraje, la RMSE obtenida fue de 709.4 kg ha⁻¹, por arriba de la reportada por Saseendran *et al.* (2004) que obtuvieron una RMSE de 500 kg ha⁻¹ pero es menor a la reportada por Langensiepen *et al.* (2008) con una RMSE de 3,200 kg ha⁻¹, quienes agregan que este error es elevado por lo cual CERES-trigo debe ser mejorado considerablemente.

Para el triticale (Eronga) se obtuvo una r^2 de 0.95 con una RMSE de 891.5 kg ha⁻¹, para el triticale (AN-125) se encontró una r^2 de 0.96 y una RMSE de 1,111.1 kg ha⁻¹ y para el triticale (AN-31-B) se obtuvo una r^2

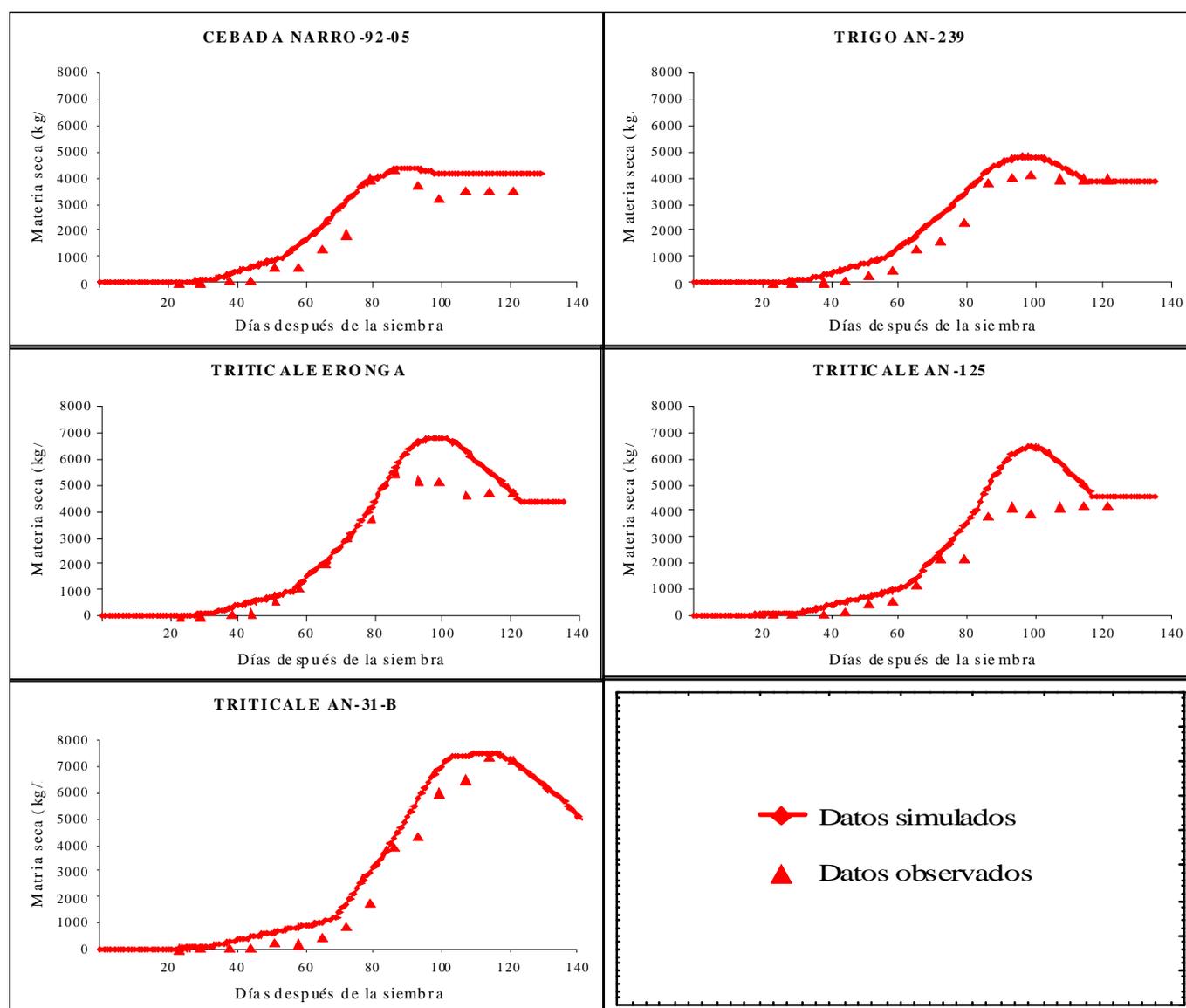


Figura 2. Acumulación de materia seca parcial en tallo durante el ciclo de cultivo en cebada, trigo y triticale, simulados por DSSAT 4.0.2.0.

de 0.98 con una RMSE de 818.5 kg ha⁻¹. Estos valores indican una alta asociación entre datos observados y simulados por los modelos, lo cual muestra que son una herramienta viable para estimar de forma aceptable la acumulación de materia seca parcial aérea.

Acumulación de materia seca parcial en tallo

Los indicadores estadísticos de calibración que se obtuvieron para el componente tallo (Cuadro 2) mostraron un coeficiente de determinación alto, lo que indica que la relación entre los datos simulados con observados tienen buen ajuste, pero la RMSE muestra que en el triticale (AN-125) existe una RMSE de 1,077.2 kg ha⁻¹, este se podría considerar elevado, sin embargo, se encuentra dentro del rango de RMSE de 672.9 a 1,414.8, a excepción de la cebada (NARRO-92-05) y trigo (AN-239) que tienen una RMSE menor y los valores de r² superan el rango 0.62 a 0.92 que reportan los modelos utilizados como ejemplos dentro del programa DSSAT.

Cuadro 2. Coeficiente de determinación (r²) y RMSE obtenidos en la simulación de acumulación de materia seca en tallo para los cultivos y variedades utilizados.

Cultivo y variedad	r ²	RMSE
Cebada (NARRO-92-05)	0.94	624.6
Trigo (AN-239)	0.96	551.5
Triticale (Eronga)	0.96	772.1
Triticale (AN-125)	0.94	1077.2
Triticale (AN-31-B)	0.97	697.9

La acumulación de materia seca en el componente tallo se muestra en la Figura 2, en esta se aprecia como al final del ciclo en el triticale Eronga y AN-125 se presentó un desfase en los días 90 a 120 lo que explica el mayor grado de variación encontrado en estos materiales.

Acumulación de materia seca parcial en hoja

Los resultados obtenidos de la simulación para esta variable indican una baja asociación entre los datos simulados y los observados (Figura 3).

Los indicadores de la calibración indican que en la cebada (NARRO-92-05) se obtuvo el menor grado de ajuste (r²=0.09; Cuadro 3), esto se explica por la caída a cero de los valores simulados a los 100 días después de la siembra lo que coincide con la finalización de crecimiento de este material y para el resto de los cultivos también se obtuvieron valores de r² bajos aunque aceptables.

En todos los materiales, los valores de r² son bajos aunque las demás variables presenten buena relación entre

simulados y observados, además la simulación de los modelos utilizados como ejemplos presentan al igual baja capacidad de simulación en este componente del rendimiento lo que indica que el programa requiere de mejoras en la simulación de esta variable.

Cuadro 3. Coeficiente de determinación (r²) y RMSE obtenidos en la calibración para la acumulación de materia seca en hoja en los cultivos y variedades utilizados.

Cultivo y variedad	r ²	RMSE
Cebada (NARRO-92-05)	0.09	424.8
Trigo (AN-239)	0.42	334.3
Triticale (Eronga)	0.48	346.9
Triticale (AN-125)	0.54	196.6
Triticale (AN-31-B)	0.36	483.4

Acumulación de materia seca parcial en grano

Los resultados obtenidos de la calibración para la acumulación de materia seca en grano se presentan en la Figura 4, donde se observa que el llenado de grano inició entre los 65 y 85 días después de la siembra y en general se encontró una buena relación entre los valores observados y simulados en todos los materiales. Los indicadores estadísticos de calibración obtenidos de los datos simulados con los observados para esta variable, indican lo siguiente: un r² de 0.58 para cebada (NARRO-92-05), y valores de RMSE de 706.1 kg ha⁻¹; Travasso y Magrin (1998) reportan una RMSE de 397 kg ha⁻¹ para rendimiento de grano en Argentina, así que la variabilidad obtenida en este trabajo puede considerarse alta, esta dispersión se explica por la diferencia entre observados y simulados al final del llenado de grano. En trigo (AN-239) se obtuvo una r² de 0.78 en el cual superó el valor de r² de 0.74 encontrado por Rodríguez *et al.* (1990) al usar CERES trigo en la simulación de rendimiento de grano y crecimiento de forraje, la RMSE fue de 565.1 kg ha⁻¹, mientras que Ghaffari *et al.* (2001) reportan una RMSE de 240 kg ha⁻¹, por otra parte Moreno-Sotomayor y Weiss (2004) en Nebraska, reportan RMSE de 811 kg ha⁻¹ y Saseendran *et al.* (2004) reportan una RMSE de 363 kg ha⁻¹ para rendimiento de grano, lo anterior indica que los 564.1 kg ha⁻¹ de desviación estándar del error obtenida en la presente investigación es aceptable considerando también que el rendimiento máximo se estimó en los 3,500 kg ha⁻¹.

Para el triticale (Eronga) se obtuvo una r² de 0.98, y una RMSE de 463.2 kg ha⁻¹, para triticale (AN-125) una r² de 0.94 y una RMSE de 761.7 kg ha⁻¹ y para triticale (AN-31-B) se obtuvo una r² de 0.95 con una RMSE de 920.2 kg ha⁻¹. La desviación estándar del error obtenida

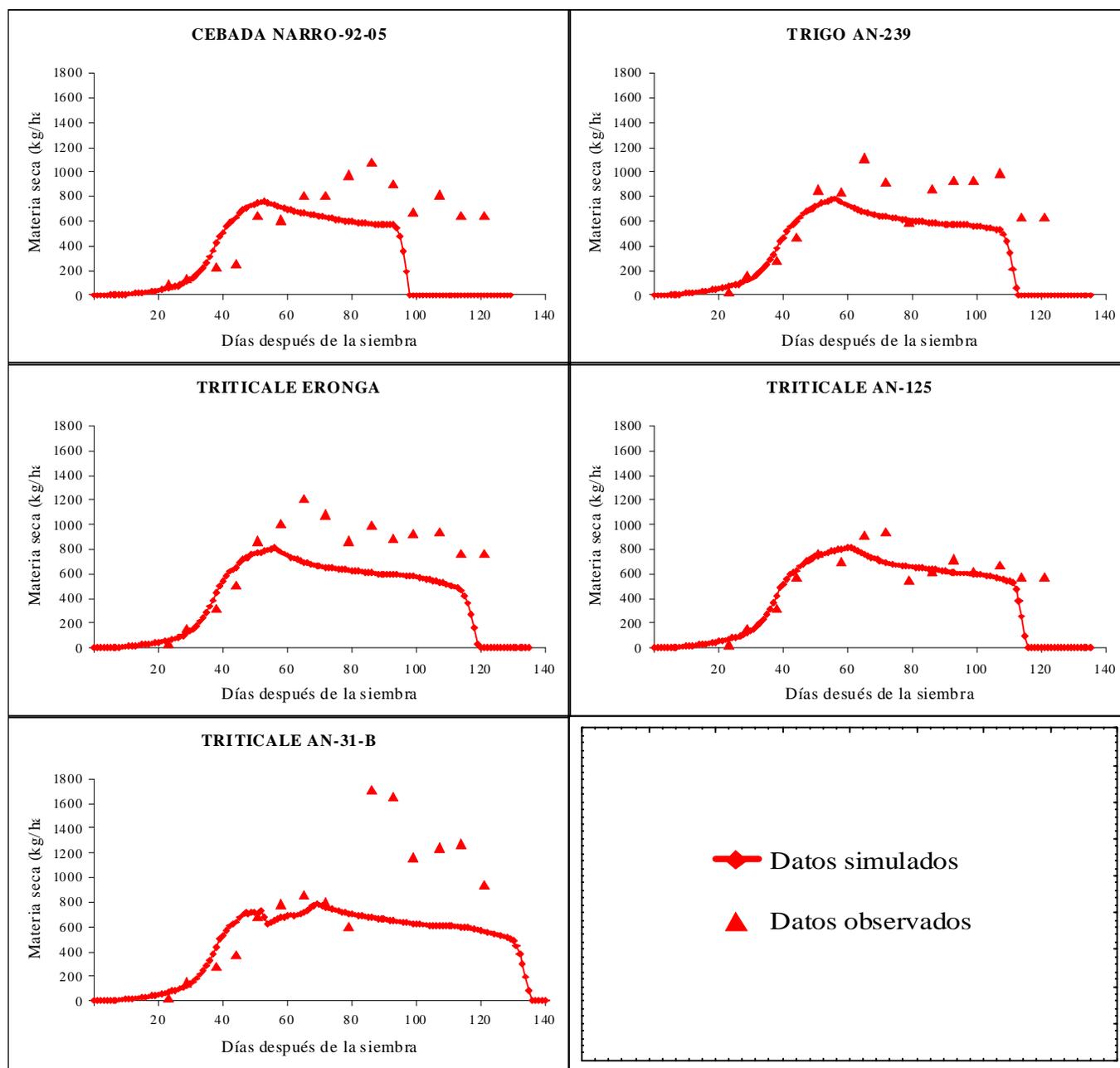


Figura 3. Acumulación de materia seca parcial en hoja durante el ciclo de cultivo en cebada, trigo y triticale, simulados por DSSAT 4.0.2.0.

en los últimos dos materiales, aunque parece elevado podría decirse que es aceptable ya que los rendimientos se estimaron en 4,500 y 6,500 kg ha⁻¹ respectivamente. Cabe mencionar que en el modelo del triticale (Eronga) se obtuvo un buen ajuste como se aprecia en la Figura 4, ya que su error es de 463.2 kg ha⁻¹ y su rendimiento se estimó en 5,500 kg ha⁻¹ es decir un sesgo del 8.4 %.

Validación

La validación se realizó para los materiales de cebada (NARRO-92-05), trigo (AN-239), y triticale (AN-31-B). Para esto, se utilizaron los datos medidos en campo del

ciclo primavera-verano 2008, y en DSSAT se utilizaron los coeficientes genéticos obtenidos en el proceso de calibración del ciclo anterior (2007).

Acumulación de materia seca parcial aérea

En la Figura 5 se presentan los valores observados y simulados por el modelo, en ésta se aprecia que, en los tres materiales, el modelo sobreestimó ligeramente al inicio del ciclo y, en el caso de la cebada (NARRO-92-05), subestimó al finalizarlo. En el triticale (AN-31-B) se presentó desfase durante todo el ciclo de cultivo.

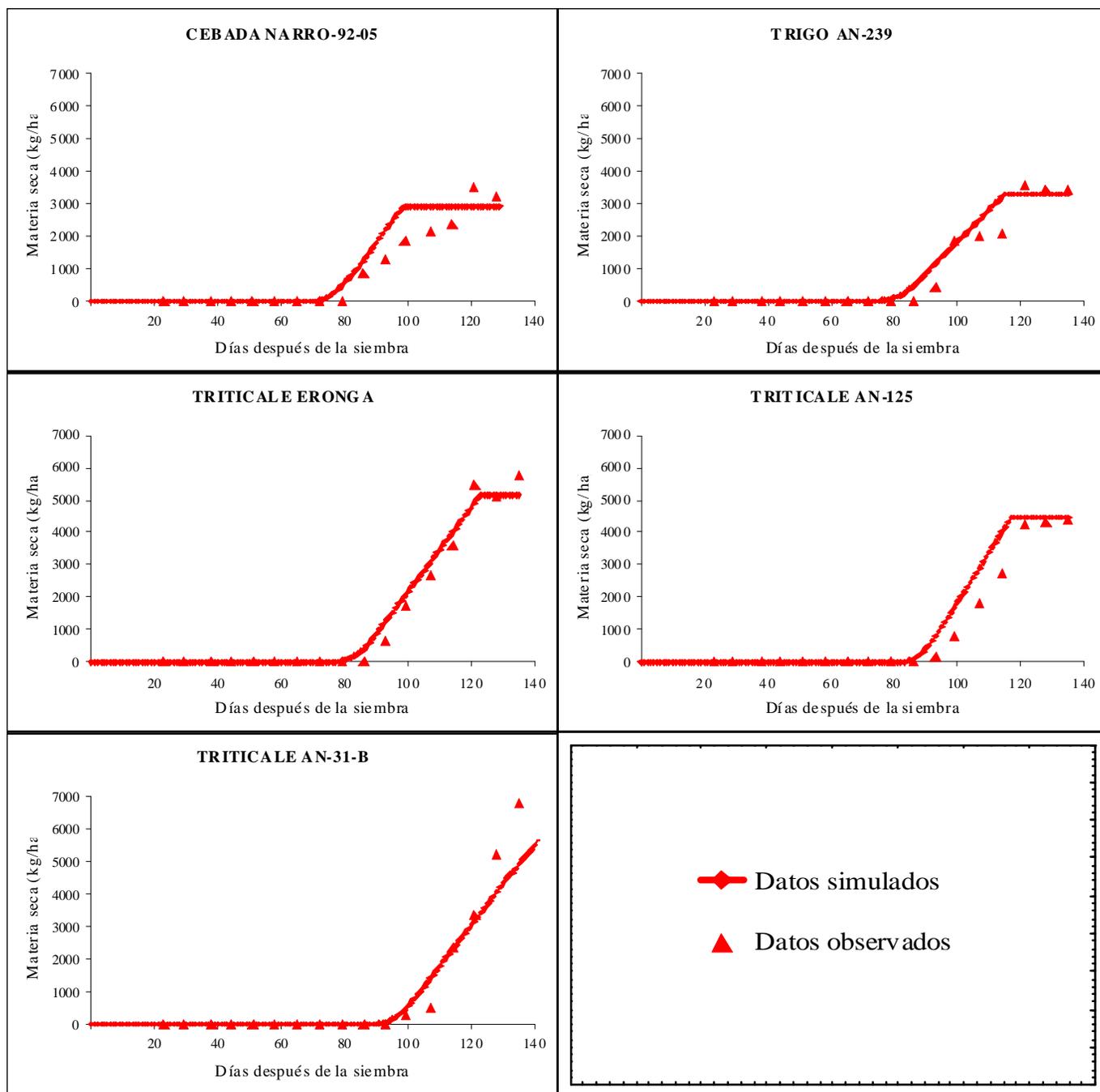


Figura 4. Acumulación de materia seca parcial en grano durante el ciclo de cultivo en cebada, trigo y triticale, simulados por DSSAT 4.0.2.0.

El grado de asociación entre valores simulados con los observados, al validar los modelos, presentó coeficientes de determinación aceptables, sin embargo, su dispersión fue elevada (Cuadro 4), sobre todo en lo que se refiere al triticale (AN-31-B) que fue de 2,184.4 kg ha⁻¹.

Todo esto indica que el modelo ofrece estimaciones aceptables, pero que requiere de mayor información de campo y mayor trabajo de calibración para disminuir su sesgo.

Cuadro 4. Coeficiente de determinación (r^2) y RMSE obtenidos en la validación para la acumulación de materia seca parcial aérea en los cultivos y variedades utilizados.

Cultivo y variedad	r^2	RMSE
Cebada (NARRO-92-05)	0.97	1779.2
Trigo (AN-239)	0.96	1059.3
Triticale (AN-31-B)	0.96	2184.4

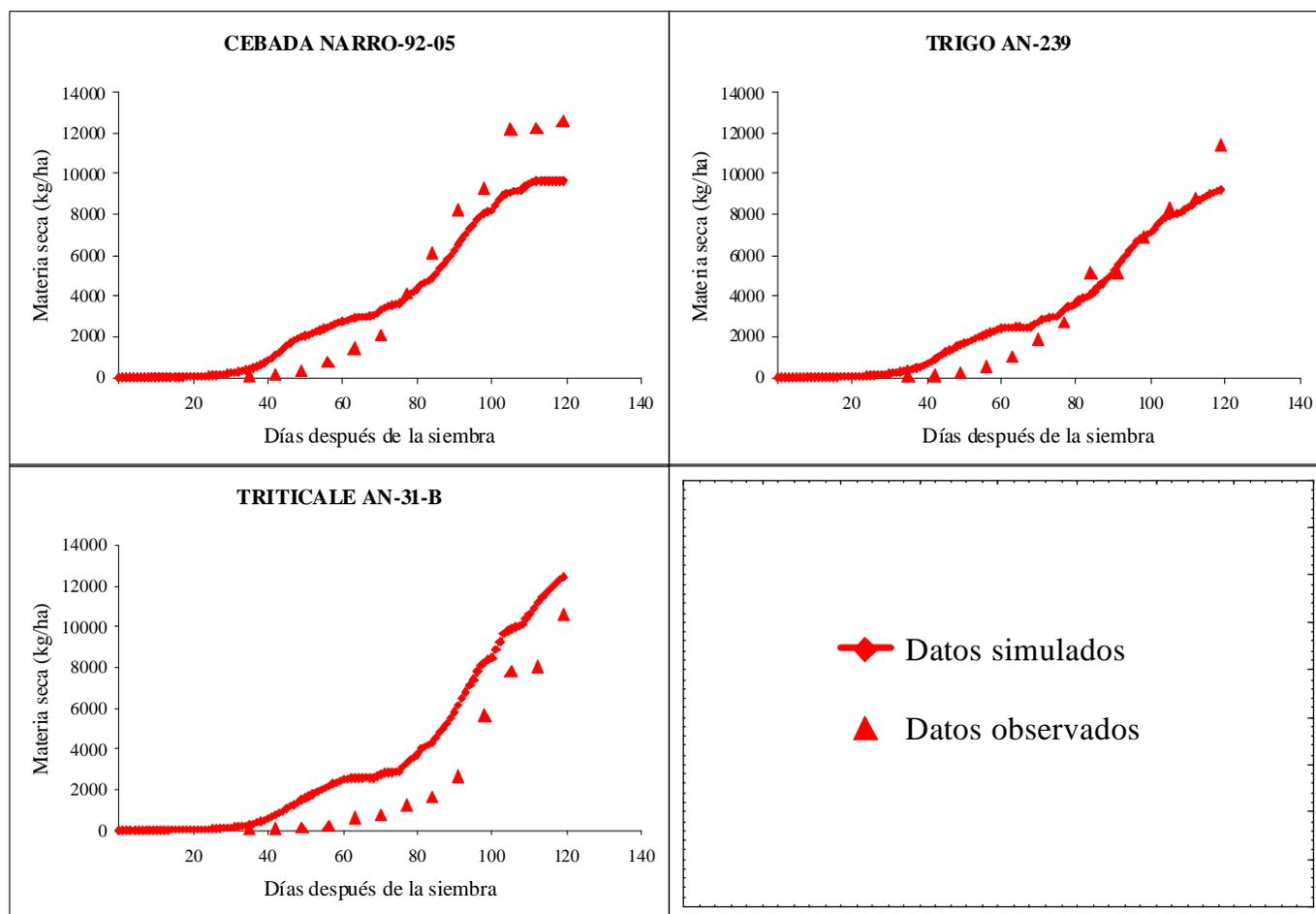


Figura 5. Acumulación de materia seca aérea, parcial durante el ciclo de cultivo en cebada, trigo, y triticale, simulados por DSSAT 4.0.2.0 calibrado.

Acumulación de materia seca parcial en tallo

Los valores observados y simulados por el modelo calibrado para la acumulación de materia seca en el componente tallo se presentan en la Figura 5.

El grado de asociación entre valores simulados y observados, presentó un r^2 (Cuadro 5) bueno, lo cual se explica por el comportamiento similar en la forma de crecimiento que hay en lo simulado y lo observado, pero el grado de error (RMSE) entre estos valores indica, al igual que en la acumulación de materia seca parcial aérea, que existe una estimación pobre por parte del modelo.

Cuadro 5. Coeficiente de determinación (r^2) y RMSE obtenidos en la validación para la acumulación de materia seca en tallo de los cultivos y variedades utilizados.

Cultivo y variedad	r^2	RMSE
Cebada (NARRO-92-05)	0.94	832.7
Trigo (AN-239)	0.96	718.0
Triticale (AN-31-B)	0.92	1854.1

Acumulación de materia seca parcial en grano

En la Figura 7 se presentan los valores observados y los simulados por el modelo, donde se puede apreciar el grado de precisión con que simuló el modelo calibrado.

El grado de asociación entre valores simulados con los observados presentó un coeficiente de determinación de 0.91 para la cebada (NARRO-92-05), un RMSE de 786.5 kg ha⁻¹, que está 389.5 kg ha⁻¹ por arriba de lo reportado por Travasso y Magrin (1998). La r^2 obtenida al validar el modelo de trigo (AN-239) fue de 0.91, y el RMSE fue de 502.4 kg ha⁻¹, el cual estuvo, 262.4 kg ha⁻¹ por arriba de lo reportado por Ghaffari *et al.* (2001) y 139.4 kg ha⁻¹ por arriba de lo reportado por Saseendran *et al.* (2004). El grado de ajuste para el triticale (AN-31-B) fue una r^2 de 0.97 y un RMSE de 973.1 kg ha⁻¹.

Los resultados obtenidos al validar el modelo muestran errores superiores a los reportados por los diferentes autores pero, considerando que en el experimento de campo de esta investigación se midió únicamente la respuesta del cultivo a una práctica de manejo, el modelo simuló con buen nivel de precisión el inicio de llenado de grano y el rendimiento total.

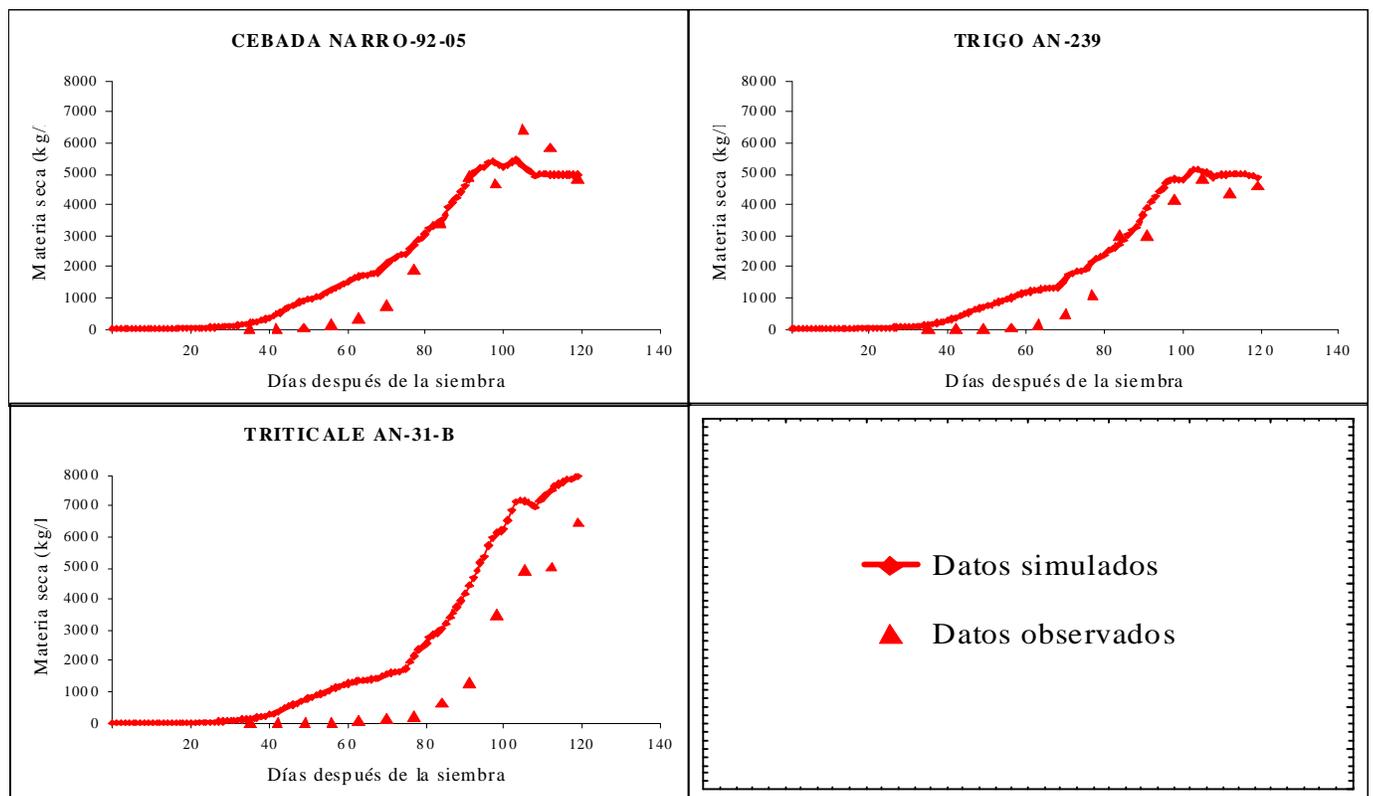


Figura 6. Acumulación de materia seca parcial en tallo durante el ciclo de cultivo en cebada, trigo, y triticale, simulados por DSSAT 4.0.2.0 calibrado.

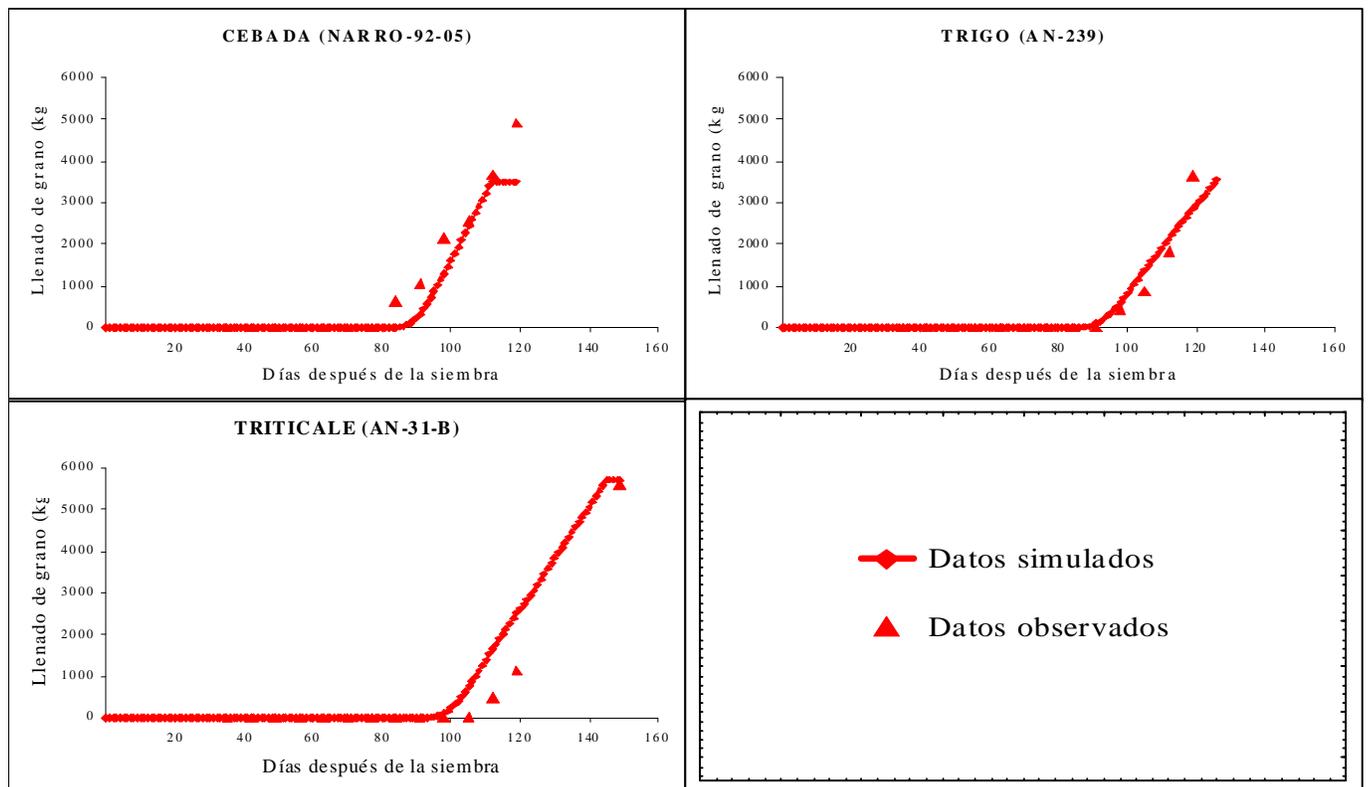


Figura 7. Acumulación de materia seca parcial en grano durante el ciclo de cultivo en cebada, trigo y triticale, simulados por DSSAT 4.0.2.0.

La calibración de los modelos de simulación utilizados por DSSAT 4.0.2.0 presentan ciertas dificultades debido a los procedimientos laboriosos de parametrización del programa en cada uno de los módulos necesarios, en los que se requiere de información detallada del crecimiento y desarrollo de los cultivos con diferentes prácticas de manejo, así como información de ambiente (suelo y clima) y características genéticas del cultivo y variedad a utilizar. Los modelos calibrados tienen una ventaja importante ya que se pueden aplicar a diferentes cultivos y variedades. Utilizando únicamente diferentes prácticas de manejo por computadora será factible la estimación de rendimientos de los cultivos y, con esto, tomar las decisiones más congruentes con los recursos disponibles en la región de trabajo.

Conclusiones

Los modelos de cebada, trigo, y triticale en el programa DSSAT 4.0.2.0 tuvieron la capacidad de simular valores semejantes a los valores observados, para la acumulación de materia seca parcial aérea, y acumulación de materia seca parcial en grano, para los 5 materiales estudiados. Al validar los modelos de cebada (NARRO-92-05), trigo (AN-239), y triticale (AN-31-B) se encontró que los modelos calibrados, aunque simulan de forma aceptable, requieren de más ajustes en base a la evaluación de los cultivos bajo diferentes prácticas de manejo. Los modelos de DSSAT 4.0.2.0 pueden ser calibrados utilizando la información de características genéticas del cultivo, ambiente (suelo y clima) del sitio así como datos experimentales y de manejo del cultivo de interés. Y de la calibración se puede caracterizar un material genético en base a su P1V, P1D, P5, G1, G2, G3 y PHINT mismos que pueden ser de mayor utilidad al conocer cuantitativamente el comportamiento de crecimiento de un cultivo y variedad específica.

Se confirma que los modelos de simulación son una herramienta viable para la predicción del crecimiento y desarrollo de cultivos forrajeros y aplicables en la toma de decisiones dentro de explotaciones agropecuarias.

Literatura Citada

Ewert, F., J. Porter y B. Honermeier. 1996. Use of AFRCWHEAT2 to predict the development of main stem and tillers in winter triticale and winter wheat in North East Germany. *Eur. J. Agron.* 5:89-103.

Ghaffari, A., H. F. Cook y H. C. Lee. 2001. Simulating winter wheat yields under temperate conditions: exploring different management scenarios. *Eur. J. Agron.*

15:231-240.

Gijssman, A. J., G. Hoogenboom, W. J. Parton y P. C. Kerridge. 2002. Modifying DSSAT crop models for low-input agricultural systems using a soil organic matter-residue module from CENTURY. *Agron. J.* 94:462-474.

Grant, W. E., E. K. Pedersen y S. L. Marín. 1997. Ecology and natural resource management: systems analysis and simulation. John Wiley & Sons Inc. New York, U.S.A. pp. 320.

Hoogenboom, G., J. W. Jones, C. H. Porter, K. J. Boote, W. D. Batchelor, L. A. Hunt, A. J. Gijssman, P. W. Wilkens, U. Singh y W. T. Bowen. 2003. DSSAT v4 Cropping system simulation model. *In:* Hoogenboom G., J. W. Jones, C. H. Porter, P. W. Wilkens, K. J. Boote, W. D. Batchelor, L. A. Hunt, y G. Y. Tsuji (Eds). Decision Support System for Agrotechnology Transfer Version 4.0. Volume 1: Overview. University of Hawaii, Honolulu, HI.

Hunt, L. A. y K. J. Boote. 1998. Data for model operation, calibration, and evaluation. pp. 9-39. *In:* Tsuji G. Y., G Hoogemboom. Thorton.(Eds). Understanding options for agricultural production. Kluwer Academic Publishers. Great Britain.

Langensiepen, M., H. Hanus, P. Schoop y W. Grasle. 2008. Validating CERES-wheat under North-German environmental conditions. *Agric. Systems* 97:34-47.

Moreno-Sotomayor, A. y A. Weiss. 2004. Improvements in the simulation of kernel number and grain yield in CERES-Wheat. *Field Crops Res.* 88: 157-169.

Odum, T. H y E. C. Odum. 2000. Modeling for all scales. Academic Press. San Diego, California. USA. pp. 457.

Rodríguez, A. N. T., James, L. W. Odell y J. B. Daniel. 1990. A Wheat grazing systems model for de US southern plains: Part I-Model description and performance. *Agric. Systems* 33:41-59.

Saseendran, S. A., D. C. Nielsen, L. Ma, L. R. Ahuja y A. D. Halvorson. 2004. Modeling Nitrogen Management Effects on Winter Wheat Production Using RZWQM and CERES-Wheat. *Agron. J.* 96:615-630.

Travasso, M. I. y G. O. Magrin. 1998. Utility of CERES-Barley under Argentine conditions. *Field Crops Res.* 57:329-333

Uehara, G. y G. Y. Tsuji. 1998. Overview of IBSNAT. pp. 1-7. *In:* Tsuji G. Y., G Hoogemboom. Thorton (Eds). Understanding options for agricultural production. Kluwer Academic Publishers. Great Britain.