



Comienzo de la floración femenina

Adaptación del modelo CSM-CERES-Maize (DSSAT) para simular la producción de maíz forrajero: variación interanual en Asturias

En este artículo se presenta el estudio realizado con base en dos líneas de trabajo: adaptación y evaluación del modelo CSM-CERES-Maize mediante la estimación de los parámetros de los cultivares a partir de un experimento de campo previo de tres años (2012, 2013 y 2014), que incluye tres cultivares (FAO 200, 300 y 400) en tres zonas de Asturias, y la utilización del análisis estacional de DSSAT para examinar la variación interanual de la productividad del maíz forrajero debida al clima.

J.A. Oliveira¹, K.J. Boote², F.A.A. Oliveira², G. Hoogenboom², A. Carballal³, A. Martínez-Fernández³

¹Área de Producción Vegetal, Departamento de Biología de Organismos y Sistemas, Universidad de Oviedo (Asturias)

²Departamento de Ingeniería Agrícola y Biológica, Universidad de Florida (EE. UU.)

³Programa de Investigación en Pastos y Forrajes. Servicio Regional de Investigación y Desarrollo Agroalimentario (Asturias)

INTRODUCCIÓN

La producción española de maíz forrajero se concentra en el norte de España. Galicia, Asturias y Cantabria son las principales regiones productoras, con 71.735 ha, 7.216 ha y 4.536 ha respectivamente (MAPA, 2022). Estas tres regiones representan el 91 % la superficie española de maíz forrajero.

Uno de los factores estructurales limitantes para aumentar la rentabilidad de las explotaciones ganaderas del norte de España es la escasa base territorial disponible para la producción de forrajes. Este hecho, unido a la irregularidad estacional de la producción, ha llevado a muchos ganaderos a adoptar estrategias de intensificación de la producción forrajera.

En la actualidad, estas explotaciones mantienen la tendencia creciente hacia el uso de maíz forrajero conservado en forma de ensilado, ya que la planta entera de maíz se considera una materia prima ideal para ensilar por su alta producción de materia seca de alto valor nutritivo, rápida recolección, no requerir ningún tratamiento previo para ser ensilado y porque es fácil de integrar en sistemas de alimentación unifeed. Centrándonos en la alimentación de rumiantes, el ensilado de maíz forrajero constituye una mezcla única de grano y fibra digestible de gran utilidad en nutrición animal (Martínez-Fernández *et al.*, 2021).

En 1996 y en colaboración con empresas productoras de semillas, se inició en Asturias un proceso de evaluación de cultivares comerciales de maíz híbrido para ensilado por parte del Servicio Regional de Investigación y Desarrollo Agroalimentario (Serida), y desde entonces se viene realizando año tras año en las zonas edafoclimáticas aptas para el cultivo de maíz forrajero (Martínez-Fernández *et al.*, 2011; Carballal *et al.*, 2022).



▶ A PESAR DE LA IMPORTANCIA DEL MAÍZ FORRAJERO PARA LA ALIMENTACIÓN DEL GANADO EN TODO EL MUNDO, EL DSSAT NO INCLUYE UN MODELO DE SIMULACIÓN DEL MAÍZ FORRAJERO, AUNQUE SE ESTÁ TRABAJANDO EN LA ACTUALIDAD EN ELLO

La variación interanual de los resultados puede ser fundamental debido a la diferente climatología (temperaturas, precipitaciones, etc.), por lo que es importante disponer de datos de más de un año para caracterizar agronómicamente un cultivar.

Los modelos de cultivos basados en procesos (funcionales) son excelentes herramientas para estudios que implican la cuantificación de los efectos de las prácticas de manejo, la genética, el suelo y el clima sobre el rendimiento y la fenología de los cultivos (Addiscott y Wagenet, 1985).

En cultivos forrajeros, Oliveira *et al.* (2020) iniciaron la adaptación del modelo CROPGRO-PFM del paquete informático del Sistema de Apoyo a las Decisiones para la Transferencia de Agrotecnología (DSSAT) (Hoogenboom *et al.*, 2019) para simular el crecimiento y el desarrollo de cuatro cultivares de raigrases en tres localidades gallegas con diferentes condiciones ambientales, determinando las limitaciones de producción asociadas tanto a las limitaciones de agua como de nitrógeno. Dicho modelo para los raigrases todavía no está disponible en la última versión del DSSAT.

El modelo CSM-CERES-Maize (Ritchie *et al.*, 1998; Jones *et al.*, 2003) dentro del mismo paquete informático DSSAT se ha utilizado ampliamente para el apoyo a la toma de decisiones sobre la gestión del riego y la fertilización, así como para la elección de cultivares de maíz grano.

Los parámetros específicos de los cultivares determinan el ciclo vital y el desarrollo reproductivo de los cultivares, incluyendo la duración de las fases y estadios vegetativos y reproductivos (Boote *et al.*, 2001). Además, DSSAT incluye módulos específicos para simular la dinámica, la temperatura y el agua del suelo, y los procesos de nitrógeno y carbono, incluida la variación del contenido de materia orgánica del suelo en función de las condiciones ambientales y la gestión agronómica (Jones *et al.*, 2003).

A pesar de la importancia del maíz forrajero para la alimentación del ganado en todo el mundo, el DSSAT no incluye un modelo de simulación del maíz forrajero, aunque se está trabajando en la actualidad en ello. ▶▶

SOLUCIONES PARA UN FORRAJE DE CALIDAD



FILM BARRERA AL OXÍGENO MÁXIMA EFICIENCIA GARANTIZADA



OXY SEAL



Tel +34 968 46 13 11

info@solplast.com / solplast.com

Avda. Francisco Jimeno Sola / Polígono Ind. Saprelorca, Buzón 9
30817 Lorca (Murcia)



Ensayo de maíz forrajero (Grado) antes de la recolección

OBJETIVOS DEL PRESENTE TRABAJO

- 1) Adaptación (calibración) y evaluación del modelo CSM-CERES-Maize mediante la estimación de los parámetros de los cultivares a partir de un experimento de campo previo de tres años (2012, 2013 y 2014), que incluye tres cultivares (FAO 200, 300 y 400) en tres zonas de Asturias.
- 2) Utilización del análisis estacional de DSSAT para examinar la variación interanual de la productividad del maíz forrajero debida al clima. Se utilizará el modelo CSM-CERES-Maize en combinación con 23 años de datos meteorológicos (2000-2022) para cuantificar la variación interanual del clima sobre las producciones de maíz forrajero en Asturias.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitios experimentales y conjunto mínimo de datos

Esta evaluación se realizó en ensayos experimentales de campo en tres lugares de Asturias: Barcia (43,5402, -6,4954, 25 m.s.n.m.), Villaviciosa (43,4722, -5,4361, 10 m.s.n.m.) y Grado (43,3764, -6,0625, 50 m.s.n.m.).

El suelo de Barcia (costa occidental de Asturias) se caracteriza por ser un suelo franco (orden Inceptisol, suborden Udepts, gran grupo Dystrudepts). El suelo de Villaviciosa, en la zona costera central, tiene una textura franco-arcillosa (orden Entisol, suborden Fluvents, gran grupo Udifluvents). El suelo de Grado, situado en un valle interior en la zona central de Asturias, es franco-arcillo-arenoso (orden Inceptisol, suborden Udepts, gran grupo Dystrudepts) (USDA-Soil Taxonomy, 1999).

Todos los sitios experimentales, según la clasificación climática de Köppen-Geiger (Kotteck *et al.*, 2006), pertenecen al clima templado oceánico (tipo Cfb). El mes más frío tiene una temperatura media inferior a 18 °C, pero superior a -3 °C. Todos los meses con temperaturas medias inferiores a 22 °C y al menos cuatro meses con una media superior a 10 °C. Sin diferencias significativas de precipitaciones entre estaciones (Arnfield, 2021).

Los datos meteorológicos se obtuvieron de las estaciones meteorológicas más cercanas a los campos experimentales a través de la Agencia Estatal de Meteorología (www.aemet.es) y se presentan en la figura 1.

Cada experimento de campo incluyó la preparación del suelo, la fertilización, la siembra de los cultivares en las parcelas y los tratamientos fitosanitarios. La siembra se realizó manualmente y de forma que se agruparan los cultivares del mismo ciclo FAO.

Previamente a la siembra, se aplicaron 150 kg N ha⁻¹ junto con las enmiendas calizas y abonado fosfopotásico necesarios según los resultados de los análisis previos del suelo, para compensar las extracciones por el cultivo de invierno en rotación con el maíz. Posteriormente, se añadieron 50 kg N ha⁻¹ cuando las plantas de maíz alcanzaron los 20 cm de altura (Carballal *et al.*, 2022).

La densidad de plantación inicial fue de 120.000 plantas ha⁻¹. Cuando las plantas alcanzaron unos 20 cm de altura, se realizó un aclareo para alcanzar la densidad final de 90.000 plantas ha⁻¹.

El maíz forrajero para su conserva-

ción como ensilado se debe recoger cuando la concentración de materia seca de todo el cultivo se sitúa entre el 30 % y el 35 %, intervalo en el que se alcanza el momento óptimo para producir ensilado (Khan *et al.*, 2015). El momento ideal para ensilar se considera cuando el estado medio del grano de las mazorcas de las 4 repeticiones para cada variedad alcanza el estado de grano pastoso-vítreo (Carballal *et al.*, 2022). La altura de corte de las plantas de maíz fue de 20-25 cm por encima de la superficie del suelo.

Se utilizó un diseño experimental de parcelas divididas con cuatro repeticiones, en el que la “parcela principal” representa el ciclo de cultivo (FAO 200, 300 y 400) y la “subparcela” representa la variedad que se va a ensayar. Las subparcelas elementales tenían una superficie de 16,8 m² con cuatro filas de 7 m de longitud y una separación entre líneas de 0,6 m. El muestreo en el momento de la cosecha se realizó recolectando las plantas en pie existentes en 5 m de longitud de las dos hileras centrales por parcela. Se separaron al azar diez plantas de las cosechadas en cada parcela. De cada una de estas plantas se separó la mazorca (granos + raquis) y el follaje (tallos + hojas + espigas de las mazorcas).

Las mazorcas y el follaje se picaron independientemente con una picadora eléctrica. Con el material picado por separado, las fracciones de mazorcas y follaje se secaron en una estufa de circulación de aire a una temperatura de 60 °C durante 24 horas (De La Roza *et al.*, 2002) para determinar el peso seco de las mazorcas y el del follaje.

De cada parcela se reconstituyó una muestra de cada cultivar, compuesta por la mezcla proporcional de mazorca y follaje según los datos anteriores.

Cada una de estas muestras se molió en un molino de laboratorio y se pasó por un tamiz de malla de 0,75 mm, realizándose análisis químicos en el Laboratorio de Nutrición Animal del Serida. ▶▶

Se determinaron y utilizaron en DSSAT las siguientes variables: fecha de floración masculina (ADAT en días tras la siembra), fecha de madurez fisiológica del maíz, en nuestros ensayos, la fecha de recolección del maíz forrajero (MDAT en días tras la siembra), producción de materia seca de la planta entera (CWAD en kg MS ha⁻¹) y producción de nitrógeno de la planta entera (CNAD en kg N ha⁻¹).

Debido a que el modelo CSM-CERES-Maize no permite en la actualidad el cálculo de unidades forrajeras leche (UFL) y la producción de unidades forrajeras leche por hectárea (UFL ha⁻¹), para poder usar esas variables en DSSAT se está modificando el código del modelo CSM-CERES-Maize. Este modelo específico para el maíz forrajero todavía no está disponible en DSSAT.

En cada lugar experimental se tomaron muestras de suelo para determinar las principales características físicas y químicas del suelo y las condiciones iniciales del mismo para las entradas del modelo (tabla 1). En todos los campos experimentales, el contenido inicial de agua del suelo se supuso igual a la capacidad de campo.

El carbono orgánico del suelo (SOC), que es una variable de entrada de DSSAT, se calculó a partir de la materia orgánica del suelo (OM) utilizando la siguiente ecuación (Périeré y Quimet, 2008): SOC suelo (%) = 0,4724 × OM suelo (%).

Enfoque para la adaptación (calibración) del modelo

Se crearon los archivos necesarios para ejecutar el modelo CSM-CERES-Maize en DSSAT v4.8: archivo X, archivo A, archivo T, archivo de suelos, archivos meteorológicos y archivo de coeficientes de cultivares (Jones *et al.*, 2003; Hoogenboom *et al.*, 2012).

Los valores de las variables de crecimiento del cultivo observadas en los experimentos se introdujeron en los archivos A y T. Posteriormente, para la calibración del modelo, los valores simulados del modelo se compararon con las mediciones observadas.

En el fichero X se introdujo información sobre las condiciones del campo, los tratamientos experimentales y las opciones de simulación. Las opciones de agua y nitrógeno se activaron (Water = Yes y Nitrogen = Yes) en la sección de control de la simulación asumiendo condiciones limitantes para el crecimiento y desarrollo del cultivo.

Actualmente, CSM-CERES-Maize simula siete estadios fenológicos: germinación, emergencia, fin de la fase juvenil, iniciación floral (floración masculina), 75 % de las plantas con sedas (estigmas) visibles (floración femenina), inicio del llenado del grano y madurez fisiológica, con una humedad del grano entre el 30-35 %. Estas etapas no dan suficientes detalles para la producción de maíz forrajero destinado a ensilar, ya que la cosecha se determina en el campo con base en la posición de la línea de leche en el grano. Esta variable (no simulada por el modelo CSM-CERES-Maize) se usa comúnmente como indicador de la humedad óptima de cosecha del maíz forrajero para ensilado (Wiersma *et al.*, 1993; Havilah *et al.*, 1995). Para superar la limitación del modelo, se asumió que la línea de leche del grano en el momento de la recolección del maíz forrajero estaba a la mitad del camino desde la corona del grano hasta la punta, 13 días antes de la madurez fisiológica, como indican Wiersma *et al.* (1993) y Braga *et al.* (2008).

CSM-CERES-Maize requiere seis parámetros, conocidos como “coeficientes genéticos”, para caracterizar diferentes cultivares. Cada coeficiente genético tiene una influencia directa sobre una variable específica del modelo de cultivo (tabla 2). Cuatro de ellos (P1, P2, P5 y PHINT) controlan el momento de los estados fenológicos, y los dos restantes (G2 y G3) caracterizan el número de granos y la tasa de crecimiento individual de los granos que determinan el rendimiento potencial de grano en condiciones óptimas. Estos coeficientes genéricos se obtuvieron mediante la minimización por ensayo y error de la raíz del error cuadrático medio para cada una de las va-

riables y el aumento del índice de ajuste de Willmott (Willmott, 1981).

Este proceso se utilizó en la secuencia sugerida por Hunt y Boote (1998), es decir, primero P1 y P5: P1 se calibró hasta el punto en que las fechas de antesis (floración masculina) observada y simulada coincidían; P5 se consideró calibrado cuando la fecha de madurez fisiológica simulada era 13 días posterior a la fecha de recolección del maíz forrajero (Wiersma *et al.*, 1993).

En ausencia de datos de peso seco de los granos, el G3 se calibró para alcanzar unos valores simulados cercanos a los 0,35 g MS grano⁻¹ indicados por Lizaso *et al.* (2018) para un cultivar de maíz FAO 300 en un ensayo en Asturias. Los valores resultantes de G2 se fijaron cercanos a 700 granos por planta (considerando una mazorca por planta), que es similar a lo indicado para el norte de España en un ensayo de maíz con un cultivar FAO 300 (López-Cedrón, 2006; Lizaso *et al.*, 2017). ▶▶



Simulación de la variación interanual de la producción de maíz forrajero

Con el fin de observar la variación interanual en la fecha de antesis, producción de materia seca de la planta entera y producción de nitrógeno de la planta entera, se ejecutó el modelo con 23 años de datos meteorológicos históricos (2000-2022) que simulaban la producción y la fenología de los tres cultivares en cada una de las tres localidades de estudio.

Los coeficientes genéticos de los cultivares utilizados en la simulación fueron los obtenidos en los experimentos de campo descritos anteriormente. Cada cultivar representa una longitud de ciclo diferente (días entre la siembra y la madurez fisiológica): FAO 200, FAO 300 y FAO 400. Se construyó un archivo DSSAT con la aplicación de análisis

estacional y un total de nueve combinaciones de localidades y cultivares (3 localidades x 3 cultivares).

Para realizar esta simulación se utilizó la herramienta de análisis estacional de DSSAT.

En la simulación se utilizaron como fechas de siembra y de recolección las indicadas por Carballal *et al.* (2022). Las opciones de agua y nitrógeno se activaron (Water = Yes y Nitrogen = Yes) en la sección de control de la simulación suponiendo condiciones limitantes para el crecimiento y desarrollo de los cultivos.

A modo de ejemplo se representaron gráficamente las medias simuladas con los 23 años de datos meteorológicos para la variable producción de materia seca por ha para cada uno de los tres cultivares en las tres localidades de estudio (figura 3). ▶▶

Figura 1. Datos meteorológicos observados diarios durante los años de evaluación (2012-2014) en las fincas experimentales de Barcia, Villaviciosa y Grado (Asturias)

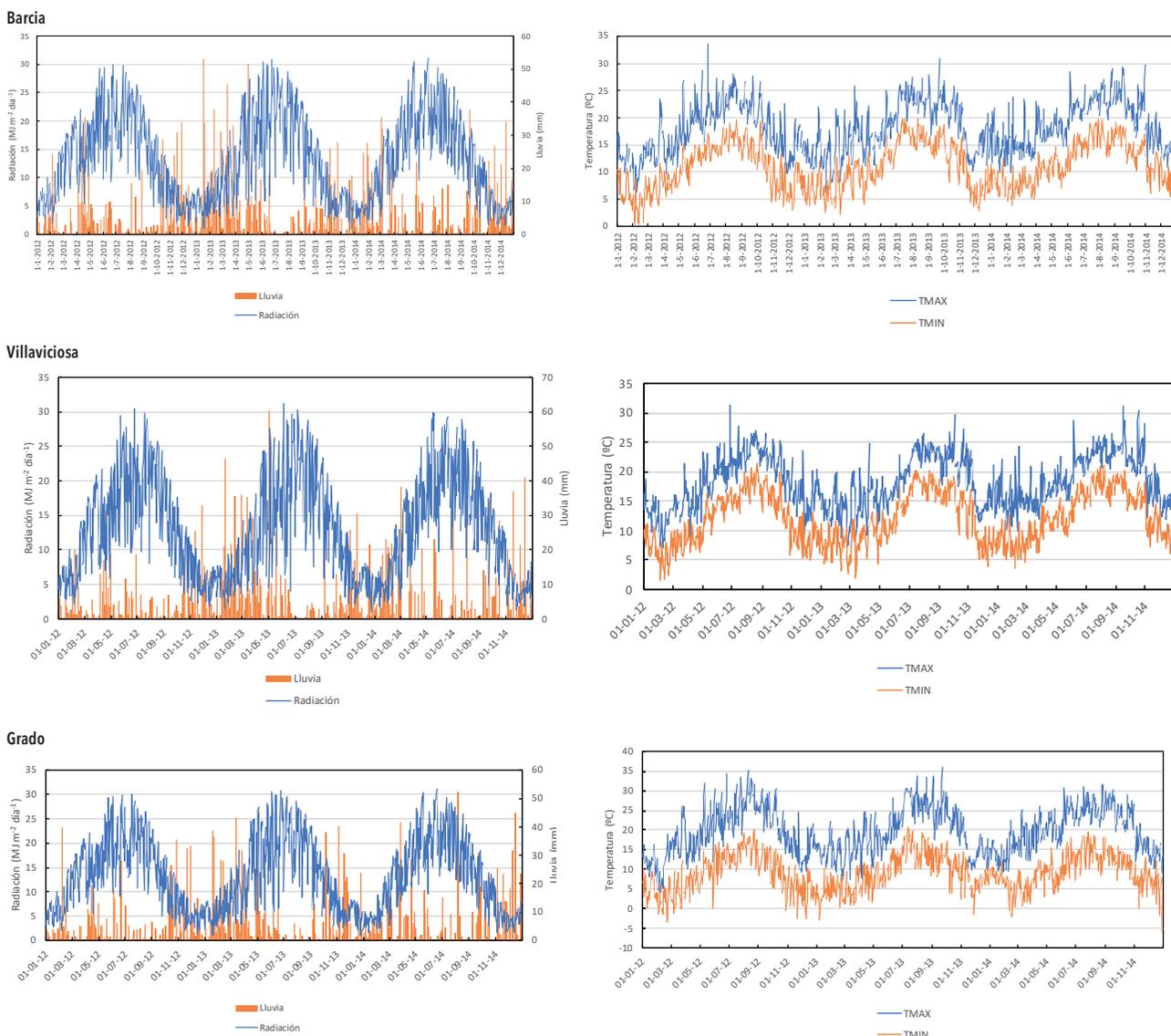


Tabla 1. Características del perfil del suelo en las fincas experimentales de Barcia, Villaviciosa y Grado (Asturias)

| Profundidad | Arcilla | Limo | SOC† | pH | LL | DUL | SAT | BD | SRGF |
|---------------------|---------|------|------|-----|-------|-------|-------|--------------------|------|
| cm | % | % | % | | v/v | v/v | v/v | g cm ⁻³ | |
| Barcia | | | | | | | | | |
| 20 | 15,4 | 52,1 | 3,0 | 5,4 | 0,108 | 0,266 | 0,460 | 1,43 | 1 |
| 40 | 18,5 | 47 | 1,9 | 5,2 | 0,119 | 0,268 | 0,469 | 1,41 | 1 |
| 60 | 21,5 | 41,9 | 0,8 | 5,1 | 0,130 | 0,272 | 0,475 | 1,39 | 1 |
| Villaviciosa | | | | | | | | | |
| 20 | 27,7 | 52,1 | 2,3 | 6,1 | 0,155 | 0,320 | 0,501 | 1,32 | 1 |
| 40 | 30 | 47 | 2,2 | 6 | 0,167 | 0,326 | 0,504 | 1,32 | 1 |
| 60 | 29 | 45 | 2 | 5,9 | 0,162 | 0,317 | 0,500 | 1,33 | 1 |
| Grado | | | | | | | | | |
| 20 | 11,3 | 37,8 | 1,51 | 6,2 | 0,096 | 0,225 | 0,429 | 1,51 | 1 |
| 40 | 15,5 | 33,7 | 1,16 | 6,2 | 0,110 | 0,233 | 0,447 | 1,47 | 1 |
| 60 | 19,7 | 29,6 | 0,85 | 6,2 | 0,126 | 0,244 | 0,460 | 1,43 | 1 |

†SOC, Carbono orgánico del suelo; LL, punto de marchitez permanente; DUL, capacidad de campo; SAT, humedad de saturación; BD, densidad aparente; SRGF, factor de distribución relativa de la longitud de las raíces del suelo (0-1)

▶ LOS PARÁMETROS ESPECÍFICOS DE LOS CULTIVARES DETERMINAN EL CICLO VITAL Y EL DESARROLLO REPRODUCTIVO DE LOS CULTIVARES

Tabla 2. Parámetros que caracterizan a cada cultivar de maíz

| Parámetro | Definición | Unidad | Variables directamente influidas por el parámetro |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------------------------------------------------|
| P1 | Tiempo térmico, desde la emergencia al final de la fase juvenil | ° C d | Fecha de antesis |
| P2 | Días de retraso en el desarrollo por cada hora de aumento en el fotoperiodo | Días | Fecha de antesis |
| P5 | Tiempo térmico, desde la floración femenina a la madurez fisiológica | ° C d | Fecha de madurez fisiológica |
| G2 | Número máximo de granos por planta | N.º de granos | Número de granos por planta |
| G3 | Tasa de llenado del grano en condiciones óptimas | mg d ⁻¹ | Peso seco por grano |
| PHINT | Tiempo térmico entre la aparición de hojas sucesivas | ° C d | Número final de hojas |

Tabla 3. Coeficientes genéticos estimados en tres cultivares obtenidos con los datos experimentales de 3 años y 3 localidades en Asturias

| Cultivares | P1 (° C d) | P2 (días) | P5 (° C d) | G2 (N.º de granos) | G3 (mg d ⁻¹) | PHINT (° C d) |
|------------|------------|-----------|------------|--------------------|--------------------------|---------------|
| FAO 200 | 135 | 0,3 | 720 | 650 | 7 | 40 |
| FAO 300 | 215 | 0,3 | 640 | 650 | 9 | 40 |
| FAO 400 | 230 | 0,3 | 660 | 650 | 8 | 40 |

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Adaptación del modelo (calibración)

La duración de la fenología del maíz se expresa en tiempo térmico (° C d). Para que la planta pase de un estado a otro tiene que acumular cierta cantidad de tiempo térmico. La temperatura base por debajo de la cual se detiene el desarrollo fenológico se considera en DSSAT para el maíz 8 °C.

En la tabla 3, se puede observar que los valores de P1 y P5 obtenidos fueron directamente proporcionales a la

longitud del ciclo de los cultivares de manera similar a lo obtenido por Braga *et al.* (2008).

P2 es el coeficiente genético de sensibilidad al fotoperiodo y fue el mismo para todos los cultivares sugiriendo que no hay sensibilidad diferenciada al fotoperiodo (Ritchie *et al.*, 1986).

PHINT es importante para ajustar el ritmo de aparición de hojas y también afecta a la duración del crecimiento vegetativo en maíz, no mostrando variación entre cultivares.

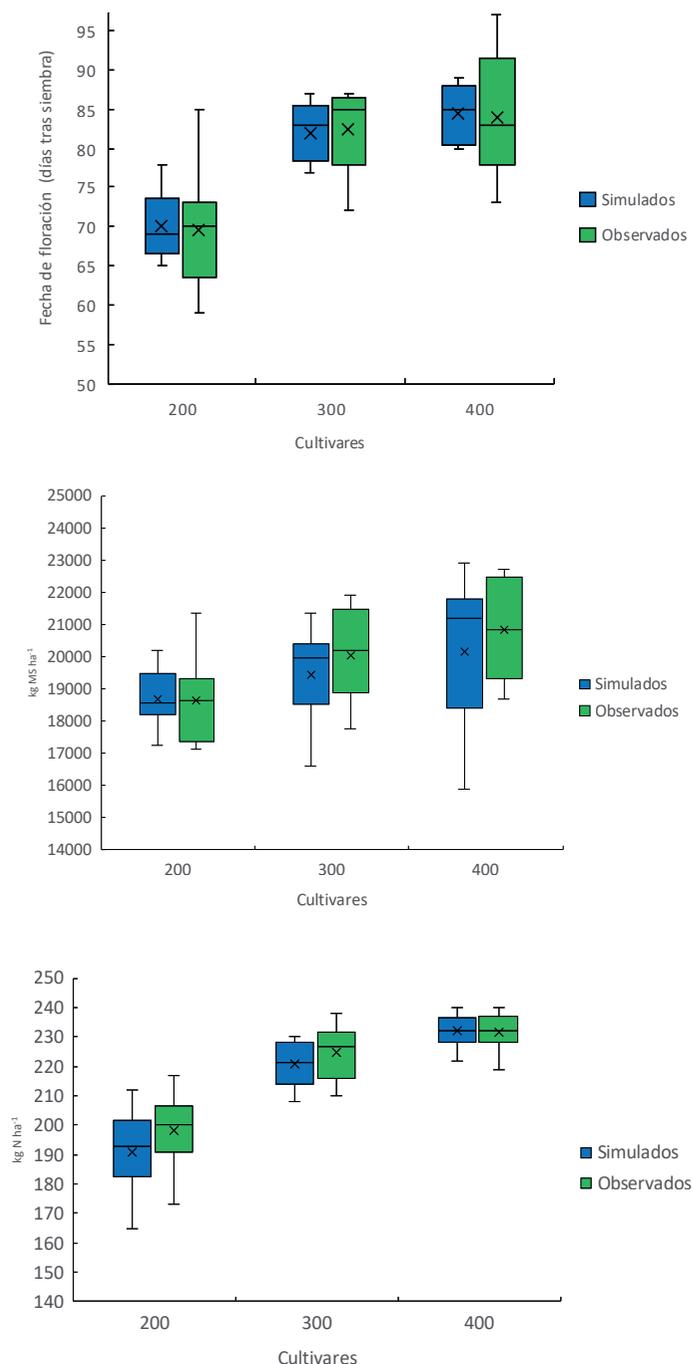
G2 y G3 son características fisiológicas de cada cultivar y se estimaron indirectamente (los valores de número de granos por planta y el peso seco de los granos no se anotaron en campo).

Evaluación del modelo adaptado

En la figura 2 se presentan los diagramas de cajas y bigotes de los valores observados y simulados medios de las variables: fecha de floración masculina, producción de materia seca de la parte aérea de la planta entera y producción de nitrógeno de la parte aérea de la planta entera. Los valores simulados de las producciones se obtuvieron indicando en el modelo, la fecha de recolección del maíz forrajero en cada ensayo.

► EL MOMENTO IDEAL PARA ENSILAR SE CONSIDERA CUANDO EL ESTADO MEDIO DEL GRANO DE LAS MAZORCAS DE LAS 4 REPETICIONES PARA CADA VARIEDAD ALCANZA EL ESTADO DE GRANO PASTOSO-VÍTREO

Figura 2. Diagrama de cajas y bigotes de los valores medios de la fecha de floración masculina, producción de materia seca de la parte aérea de la planta entera y producción de nitrógeno de la parte aérea de la planta entera para tres cultivares de maíz forrajero en tres localidades: Barcia, Villaviciosa y Grado, y tres años: 2012, 2013 y 2014. Simulación con limitación de agua y nitrógeno



Los resultados muestran que los valores simulados por el modelo se ajustan bien a los valores observados para cada uno de los cultivares, debido a que la línea mediana de las cajas de los valores observados no se sale de la caja de valores simulados, con lo cual no hay diferencia entre los valores observados y simulados para los tres cultivares.

Las líneas medianas y los valores medios (representados por una "x" en las figuras), van aumentando a medida que aumenta el ciclo de los cultivares.

Las cajas más largas indican que hay mayor dispersión de los valores como ocurre por ejemplo con los valores observados respecto a los valores simulados, en el caso de la fecha de floración.

En el caso de la fecha de floración, los valores observados en el cultivar 200 muestran una mayor dispersión (entre 59 y 85 días tras la siembra) que en el caso del cultivar 300, que muestra una fecha de floración menos dispersa (entre 72 y 86 días tras la siembra).

Simulación de la variación climática interanual

Con el fin de observar la variación interanual en la fecha de antesis, producción de materia seca de la planta entera y producción de nitrógeno de la planta entera se ejecutó el modelo con 23 años de datos meteorológicos históricos (2000-2022) que simularon la producción y la fenología de los tres cultivares en cada una de las tres localidades de estudio.

Se presentan en la figura 3 los resultados obtenidos mediante simulación en las tres localidades para los tres cultivares estudiados para la variable producción de materia seca de la planta entera. En la simulación se utilizaron como fechas de siembra y de recolección las indicadas por Carballal *et al.* (2022).

Se observó que el cultivar de ciclo más largo (FAO 400) es el que presentó en general los valores más altos para esa variable en los 23 años de datos históricos meteorológicos en las tres localidades. En Villaviciosa y Grado se observan algunos años en que la producción del cultivar FAO 300 fue similar o un poco superior a la del cultivar FAO 400.

Villaviciosa fue la localidad que presentó valores más altos de producción de materia seca (FAO 200 = 18.790 kg MS ha⁻¹, SD = 1.343,5; FAO 300 = 23012 kg MS ha⁻¹, SD = 1.333,8; FAO 400 = 23.279 kg MS ha⁻¹, SD = 1.150,1) considerando la media de los 23 años de datos meteorológicos.►►

Figura 3. Comparación de la producción de materia seca de la planta entera (kg MS ha⁻¹) simulada mediante 23 años de datos meteorológicos en Barcia, Villaviciosa y Grado para los tres cultivares estudiados (FAO 200, FAO 300 y FAO 400)



En las tres localidades, las producciones más altas se alcanzaron durante el ciclo de cultivo (periodo entre siembra y recolección) con unas temperaturas medias de máximas diarias entre 21,6-23,1 °C, unas temperaturas medias de mínimas diarias entre 13,1-15,8 °C, una radiación solar media diaria entre 18,1-19,4 MJ m⁻² día⁻¹ y una precipitación total en el ciclo de cultivo entre 305-313 mm.

El código del modelo CSM-CERES-Maíz se modificará para simular y obtener la producción de maíz forrajero (kg peso fresco ha⁻¹), concentración de materia seca en la parte vegetativa (%), concentración de materia seca en la biomasa total (%), peso fresco de la mazorca (kg ha⁻¹), concentración de materia seca de la mazorca (%), producción de biomasa total (kg MS ha⁻¹), producción de materia seca de la mazorca (kg MS ha⁻¹), índice de cosecha de la mazorca (producción de materia seca de la mazorca/producción

total de biomasa), proteína bruta de la biomasa total (% MS), producción de proteína bruta (kg ha⁻¹) y la energía neta de la biomasa total (unidades forrajeras leche-UFL kg MS⁻¹ o Mcal kg MS⁻¹ y producción de unidades forrajeras leche-UFL ha⁻¹ o Mcal ha⁻¹) del maíz en respuesta al clima, el suelo y al cultivar.

Teniendo en cuenta un probable aumento de la temperatura y disminución de las precipitaciones en los próximos años en el norte de España, se podría ver cómo influirían estos posibles cambios en la simulación de la producción y calidad de biomasa de maíz forrajero con el modelo CSM-CERES-Maíz usando la aplicación estacional de DSSAT. La utilización de la información obtenida por este modelo por parte de los usuarios/agricultores se realizaría a través del Servicio Regional de Investigación Agroalimentaria en colaboración con el Área de Producción Vegetal de la Universidad de Oviedo.

CONCLUSIÓN

La adaptación del modelo CSM-CERES-Maize para simular las producciones del maíz forrajero se realizó mediante la calibración de los parámetros genéticos de tres cultivares (FAO 200, 300 y 400) del modelo CSM-CERES-Maize con datos de evaluación de estos en tres localidades de Asturias en los años 2012, 2013 y 2014.

Esta calibración ha permitido en conjunción con datos históricos meteorológicos (23 años) de las localidades de estudio poder simular los valores de producciones de los tres cultivares estudiados en dichos años.

No existe en la actualidad un modelo específico para el maíz forrajero en el paquete DSSAT de modelos de cultivos. Se espera poder incorporar próximamente un modelo para el maíz forrajero en DSSAT mediante la utilización de datos de evaluación agronómica de cultivares de maíz forrajero en Asturias, Galicia y Estados Unidos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la concesión de una beca para una estancia de investigación en la Universidad de Florida (Gainesville, Estados Unidos) por el "OECD Co-operative Research Programme" en 2022. ■