

**Escola Politécnica Superior
Universidade de Santiago de Compostela**

**INTENSIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN
FORRAJERA EN GALICIA Y EVALUACIÓN DEL
MODELO CERES-Maize**

Tesis Doctoral

Francisco Xavier López Cedrón

Ingeniero Agrónomo

2006

**Escola Politécnica Superior
Universidade de Santiago de Compostela**

**INTENSIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN
FORRAJERA EN GALICIA Y EVALUACIÓN DEL
MODELO CERES-Maize**

Tesis Doctoral

Francisco Xavier López Cedrón
Ingeniero Agrónomo
2006

Director
Federico Sau Sau
Dr. Ingeniero Agrónomo

D. Federico Sau Sau, Dr. Ingeniero Agrónomo, Catedrático del Área de Producción Vegetal de la USC.

CERTIFICA:

Que, bajo su dirección, D. *Francisco Xavier López Cedrón* ha desarrollado en la Escola Politécnica Superior, la presente memoria titulada: “**Intensificación de la producción forrajera en Galicia y evaluación del modelo CERES-Maize**”, que presenta para optar al grado de Doctor Ingeniero Agrónomo.

Considerando que constituye un trabajo de Tesis Doctoral, autoriza su presentación en la Universidade de Santiago de Compostela para ser valorada por el tribunal correspondiente.

Y, para que así conste, a los efectos oportunos, expide el presente certificado en Lugo, a 17 de enero de 2006.

Fdo.: Federico Sau Sau.

Agradecementos

En primeiro lugar quero expresar o meu agradecemento ó Dr Federico Sau, polo seu apoio en todo momento, incluso cando este traballo tivo que quedar nun segundo lugar, para conseguir outros obxectivos profesionais. Por entusiasmar-me, xa dende un lonxano terceiro curso de carreira no intento de comprender como funciona un sistema de cultivo.

En segundo lugar, ó meu infatigable colaborador Juanjo. Ó que despois lle tomou o relevo, non con menos afínco, Paco, cando os demais chegá-bamos xa estaba todo listo para traballar.

Ó profesor Juan Piñeiro, pola súa paciencia e inestimable axuda e ensinanzas. Ó Dr. Benigno Ruíz Nogueira polos múltiples problemas que solucionou e pola axuda prestada en todo momento. Ó Dr. Kenneth J. Boote, por involucrase neste traballo, pese ás súas múltiples ocupacións.

A Emilio, Vanesa e Martelo, pola súa axuda nos ensaios de campo e no traballo de laboratorio.

Os meus compañeiros doutorandos: Juan Luis, José Antonio Marra e Adriana. Para esta última un agradecemento especial pola revisión deste traballo.

Ó Dr. Jesús Moreno e ó Dr Alberto Oliveira pola súa axuda na análise estatística dos datos. Á Dra. Pilar Salgado pola axuda prestada para solucionar os problemas cos códigos FORTRAN dos modelos. Profesor Mario Hernández, Dr. Santiago Pereira e Dra. Ana Ramos.

A todos os que me axudaron nos ensaios de campo e no laboratorio, e dun xeito especial a Agustín, Quique, Verónica, José Marcos, Ana Sío, Loreto, Juan e Jose.

Á miña familia.

A Ana

ÍNDICE DE MATERIAS

Abreviaturas.....	VII
--------------------------	------------

Resumen.....	XIII
---------------------	-------------

CAPÍTULO 1.- INTENSIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN FORRAJERA EN GALICIA.....	1
--	----------

1.1. INTRODUCCIÓN	3
1.1.1. Intensificación de la producción forrajera.....	3
1.1.2. Las rotaciones forrajeras intensivas	4
1.1.3. Laboreo convencional y siembra directa.....	7
1.1.4. Efecto del déficit hídrico: regadío y secano	9
1.1.5. Objetivos del capítulo primero	10
1.2. MATERIAL Y MÉTODOS	12
1.2.1. Localización de los ensayos	12
1.2.2. Características meteorológicas de los años experimentales	13
1.2.3. Material vegetal	15
1.2.4. Diseño experimental.....	15
1.2.5. Descripción de los ensayos.....	16
1.2.5.1. Siembra.....	16
1.2.5.1.1. Preparación del terreno.....	16
1.2.5.1.2. Profundidad, densidad y fechas de siembra	17
1.2.5.2. Fertilización.....	18
1.2.5.3. Riego	20
1.2.5.4. Tratamientos fitosanitarios	21
1.2.6. Evolución de la producción de biomasa y distribución de la materia seca entre los diferentes órganos. Fechas de cosecha	22
1.2.7. Procesado de los datos y análisis estadísticos	24
1.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	26

1.3.1. Producción de biomasa del Raigrás italiano no alternativo (RINA).....	26
1.3.2. Producción de biomasa del raigrás italiano alternativo (RIA).....	33
1.3.3. Maíz.....	37
1.3.3.1. Producción de biomasa.....	37
1.3.3.2. Producción de grano e índice de cosecha	42
1.3.4. Producción de biomasa total de las rotaciones estudiadas	43
1.4. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO PRIMERO	49
 CAPÍTULO 2.- EVALUACIÓN DEL MODELO CERES-Maize EN GALICIA...	51
2.1 INTRODUCCIÓN	53
2.1.1. Análisis de sistemas y modelos de simulación	53
2.1.2. Las etapas de construcción de un modelo	55
2.1.3. Modelos matemáticos de simulación del crecimiento de los cultivos	55
2.1.4. El modelo matemático de simulación del crecimiento del maíz: CERES-Maize.....	58
2.1.5. Principios básicos de las simulaciones con CERES-Maize.....	60
2.1.6. Desarrollo del cultivo	62
2.1.6.1. Respuesta térmica de la tasa de desarrollo	62
2.1.7. Acumulación de biomasa.....	65
2.1.7.1. Factor reductor de la fotosíntesis (PRFT)	66
2.1.7.2. Tasa relativa de llenado de grano (RGFILL).....	68
2.1.7.3. Eficiencia en el uso de la radiación (EUR).....	69
2.1.7.4. Coeficiente de extinción (EXT) para la radiación fotosintéticamente activa (PAR).....	70
2.1.7.5. Eficiencia en la conversión de la materia seca vegetativa removilizada al grano	70
2.1.7.6. Número de granos por planta y tasa de crecimiento del grano	71
2.1.7.7. Cálculo del índice de área foliar	72

2.1.8. Balance de agua en el suelo y cálculo de los factores de estrés hídrico del cultivo	72
2.1.8.1. Balance de agua del suelo, crecimiento de las raíces, y extracción de agua en CERES-4.0	73
2.1.8.2. Opciones de cálculo de la evapotranspiración en CERES-4.0	75
2.1.8.3. reparto de la evapotranspiración potencial (E0) entre evaporación potencial (ES0) y transpiración potencial (EP0) en CERES-4.0	75
2.1.9. Objetivos del capítulo segundo.....	77
 2.2. MATERIAL Y MÉTODOS	78
2.2.1. Ensayos de campo	78
2.2.2. Temperatura y precipitación durante la estación de crecimiento	80
2.2.3. Seguimiento de parámetros ecofisiológicos	82
2.2.3.1. Fenología	82
2.2.3.2. Índice de área foliar (IAF).....	84
2.2.4. Determinación de los coeficientes genéticos del cv. clarica	84
2.2.5. Características del perfil del suelo, medidas del contenido de agua del suelo y condiciones iniciales empleadas en las simulaciones	86
2.2.6. Humedad volumétrica del suelo a saturación, función de enraizamiento preferente en el perfil del suelo utilizada y profundidad de enraizamiento. Ajustes finales de DUL para las simulaciones en condiciones de secano.....	90
2.2.7. Versiones de CERES-Maize empleadas	91
2.2.8. Simulaciones.....	91
2.2.9. Procedimientos estadísticos y gráficos empleados para evaluar las diferentes versiones estudiadas de CERES-Maize, opciones de cálculo de evapotranspiración potencial, coeficientes de extinción y modificaciones del modelo	92
 2.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	94
2.3.1. Evaluación de tres versiones del modelo CERES-Maize bajo condiciones no limitantes del medio	94
2.3.1.1. Predicción de la fenología	94

2.3.1.2. Precisión a lo largo del ciclo, de las estimaciones de biomasa, grano e índice de área foliar (IAF) de las diferentes versiones de CERES-Maize	95
2.3.1.3. Precisión de las estimaciones de biomasa y rendimiento en grano en cosecha, y de las estimaciones de IAF máximo de las diferentes versiones de CERES-Maize	106
2.3.1.4. Causas principales de las diferencias registradas en las salidas de las diferentes versiones del modelo	108
2.3.1.5. ¿Qué funciones de temperatura son las correctas?.....	111
2.3.2. Evaluación del modelo CERES-Maize V-4.0 en condiciones de secano	114
2.3.2.1. Recalibración de los coeficientes genéticos G2 y G3	114
2.3.2.2. Estimaciones del modelo original: adecuadas en los tratamientos regados pero inferiores a las esperadas en secano.....	115
2.3.2.3. Características del suelo, condiciones hídricas iniciales y dinámica de extracción del agua del suelo	124
2.3.2.4. Evaluación de ecuaciones alternativas para el cálculo de la evapotranspiración potencial.....	129
2.3.2.5. Evaluación del coeficiente de extinción que divide la evapotranspiración potencial entre evaporación potencial y transpiración potencial.....	130
2.3.2.6. Evaluación de funciones alternativas para estimar el crecimiento diario de los granos y el número de granos por planta.....	132
2.3.2.7. Análisis de sensibilidad de posibles cambios en las funciones de enraizamiento	137
2.4. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO SEGUNDO.....	143
2.4.1. Conclusiones de la evaluación de tres versiones del modelo CERES-Maize bajo condiciones no limitantes del medio	143
2.4.2. Conclusiones de la evaluación del modelo CERES-Maize V-4.0 en condiciones de secano	144
Bibliografía.....	147

ABREVIATURAS

ABREVIATURAS 1ª PARTE

MS: materia seca (t ha^{-1})
RG: radiación global ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
 $T_{\text{máx}}$: media mensual de las temperaturas máximas ($^{\circ}\text{C}$)
 T_{min} : media mensual de las temperaturas mínimas ($^{\circ}\text{C}$)
P: precipitación mensual acumulada (mm)
RIA: raigrás italiano alternativo
RINA: raigrás italiano no alternativo
M: maíz
R: regadío
S: secano
LC: laboreo convencional
SD: siembra directa
cv.: cultivar

ABREVIATURAS 2ª PARTE

a : ordenada en el origen de la regresión lineal
 b : pendiente de la regresión lineal
CARBO: acumulación diaria de biomasa por planta ($\text{g pl.}^{-1} \text{d}^{-1}$)
CERES: Crop Environmental Resource Syntesis
CUMDDT: sumatorio del tiempo térmico diario acumulado desde la germinación ($^{\circ}\text{Cd}$)
 d : índice de ajuste de Willmott
DSSAT: Decision Support System for Agrotechnology Transfer
DDT: tiempo térmico del día ($^{\circ}\text{C d}$)
DUL(L): contenido de agua al del horizonte de suelo L al límite superior de drenaje o punto de capacidad de campo (fracción en vol.)
E0: evapotranspiración potencial diaria del cultivo y del suelo (mm d^{-1})
EP: transpiración del cultivo (mm d^{-1})
EP0: transpiración potencial del cultivo (mm d^{-1})
ES: evaporación del suelo (mm d^{-1})
ES0: evaporación potencial del suelo (mm d^{-1})
Etc: evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (mm d^{-1})
ETo: evapotranspiración de referencia (mm d^{-1})
EUR: eficiencia en el uso de la radiación ($\text{g (materia seca) MJ (PAR)}^{-1}$)
EXT: coeficiente de extinción para la PAR
G2: coeficiente genético que define el número potencial de granos por planta
G3: coeficiente genético que define la tasa de crecimiento potencial diario de un grano ($\text{mg grano}^{-1} \text{d}^{-1}$)
GPP: número de granos por pl.
GROEAR: tasa de crecimiento de la espiga por planta y día ($\text{g pl.}^{-1} \text{d}^{-1}$)
GROGRN: tasa de crecimiento de la masa de grano por planta y día ($\text{g pl.}^{-1} \text{d}^{-1}$)
HRLT: número de horas de luz (h)
IAF: índice de área foliar ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$)
IC: índice de cosecha

IPAR: radiación fotosintéticamente activa interceptada por la cubierta ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)

Kc: coeficiente de cultivo

KEP: coeficiente de extinción para el reparto de la energía radiante entre evaporación y transpiración

LL(L): contenido de agua del horizonte de suelo L al límite inferior o punto de marchitez permanente (fracción en vol.)

NFAC: factor de estrés de nitrógeno (0.00-1.00)

P1: coeficiente genético que define los grados día con base 8°C desde emergencia hasta el final de la fase juvenil ($^{\circ}\text{C d}$)

P2: coeficiente genético que define la sensibilidad al fotoperíodo (0.00-1.00)

P5: coeficiente genético que define los grados día con base 8°C desde 75% de emisión de sedas hasta madurez fisiológica ($^{\circ}\text{C d}$)

PAR: radiación fotosintéticamente activa ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)

PCARB: acumulación potencial de biomasa por planta ($\text{g (CH}_2\text{O) pl.}^{-1} \text{ d}^{-1}$)

PFAO56: evapotranspiración potencial del cultivo calculada según Penman-Montieth-FAO56 (mm d^{-1})

PLTPOP : densidad de plantas por unidad de superficie (pl m^{-2})

PMEAN: presión de vapor a saturación a TEMPM (Kpa)

PMIN: presión de vapor a saturación a TMIN (Kpa)

PRFT: función de temperatura que afecta EUR (0.00-1.00)

PSKER: tasa media de fotosíntesis por planta del período comprendido entre antesis y principio de llenado efectivo de grano ($\text{mg (CH}_2\text{O) pl.}^{-1} \text{ d}^{-1}$)

PT: evapotranspiración potencial del cultivo calculada según Priestley-Taylor (tal como lo formuló Ritchie) (mm d^{-1})

R1: estadio fenológico de maíz 50% de plantas con alguna seda visible

R2: estadio fenológico de maíz 50% de plantas en estadio de “ampollitas” (endosperma abundante, claro y fluido)

R3: estadio fenológico de maíz 50% de plantas en estadio “lechoso”

R4: estadio fenológico de maíz 50% de plantas en estadio “pastoso”

R5: estadio fenológico de maíz 50% de plantas en estadio “dentado”

R6: estadio fenológico de maíz 50% de plantas en madurez fisiológica

R7: estadio fenológico de maíz 50% de plantas en madurez de cosecha

RATEIN: tasa de inducción fotoperiódica (suma el valor de 1)

RGFILL: función de temperatura que describe la tasa relativa de llenado de grano (0.00-1.00)

RLV(L): densidad calculada de raíces en el horizonte L ($\text{cm raíz cm}^{-3} \text{ suelo}$)

RMSE: raíz cuadrada de la media de los cuadrados del error

ROWSPC: distancia entre líneas de cultivo (cm)

RTDEP: profundidad de enraizamiento (cm)

RWU(L): extracción potencial de agua por el sistema radical en el horizonte L (mm d^{-1})

RWU: extracción potencial de agua por el sistema radical (mm d^{-1})

SALB: albedo del suelo (fracción)

SAT(L): contenido de agua a saturación del horizonte de suelo L (fracción en vol.)

SDEPTH: profundidad de siembra (cm)

SLDR: tasa de drenaje (fracción d^{-1})

SLRO: número de la curva de escorrentía del suelo (Soil Conservation Service)

SLU1: límite de evaporación de la fase 1 del proceso de secado del suelo (mm)
SR: radiación solar total diaria ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
SRGF(L): factor de distribución relativa de longitud de raíces en el horizonte L (0.00-1.00)
SWDF: factor de déficit de agua en el horizonte L donde se produce el frente de avance radicular (0.00-1.00)
SWFAC: factor de estrés hídrico de suelo que afecta a la fotosíntesis (0.00-1.00)
TAVGD: temperatura media durante las horas de luz diurna ($^{\circ}\text{C}$)
TBASE: temperatura base del proceso ($^{\circ}\text{C}$)
TEMPM: temperatura media diaria ($^{\circ}\text{C}$)
TLNO: número total de hojas del cultivo
TMAX: temperatura máxima diaria ($^{\circ}\text{C}$)
 $T_{\text{máx}}$: temperatura media decenal de las máximas diarias ($^{\circ}\text{C}$).
TMFAC(I): ocho factores de corrección de la temperatura del aire cada tres horas
TMIN: temperatura mínima diaria ($^{\circ}\text{C}$)
 $T_{\text{mín}}$: temperatura media decenal de las mínimas diarias ($^{\circ}\text{C}$)
TT: tiempo térmico ($^{\circ}\text{C d}$)
TTMP (I): temperatura media del aire cada tres horas ($^{\circ}\text{C}$)
TURFAC: factor de estrés de turgencia (0.00-1.00)
V(n): estadio fenológico de maíz 50% de plantas con “collar” de la hoja n visible
VE: estadio fenológico de maíz 50% de plantas emergidas
VPD: déficit de presión de vapor (kPa)
VT: estadio fenológico de maíz 50% de plantas con el penacho completamente expandido pero las sedas aún no visibles

RESUMEN

En ensayos de campo realizados en Lugo entre los años 1997 y 2002, se ha comparado el rendimiento en regadío (R; condiciones no limitantes del medio) y en secano (S) de la rotación raigrás italiano alternativo-maíz (RIA-M), de dos cultivos por año, con la de raigrás italiano no alternativo (RINA), prevista para sembrar cada dos años, como base para intensificar la producción de forraje en Galicia. Además, se probaron dos técnicas de siembra en la rotación RIA-M: Laboreo convencional (LC) y siembra directa (SD).

Considerando la rotación de dos cultivos por año, las producciones medias de los cinco años estudiados, se situaron en 28.00, 21.67, 27.93 y 20.90 t ha⁻¹ de materia seca (MS) (LC R, LC S, SD R y SD S, respectivamente). En el caso del RINA se situaron en 15.69 y 8.27 t ha⁻¹ de MS (RINA R y RINA S respectivamente). Como se ve, los rendimientos de la rotación más intensiva (RIA-M) han sido muy superiores a los de RINA, e incluso en condiciones de secano supera al RINA R en un 36%, como promedio de los cinco años estudiados.

Dentro de la rotación RIA-M, en la mayor parte de los años ensayados no se detectaron diferencias atribuibles al sistema de siembra. Estos datos experimentales parecen mostrar, que en general y considerando la media de producción de años sucesivos, la técnica de siembra no afecta a la producción de RIA-M.

Las producciones de los tratamientos R han superado ampliamente a los S. Dentro de la rotación RIA-M, esto fue debido a las mayores producciones del Maíz R, ya que las producciones del RIA precedidas de Maíz S fueron superiores en cuatro de los años ensayados a las precedidas de Maíz R. En el RINA las producciones de los tratamientos R también han sido superiores. Incluso en el verano de 1998, el tratamiento RINA S se secó completamente debido a la combinación del déficit hídrico con el estrés de temperatura, no rebrotando el otoño siguiente, con lo que la producción este año fue nula.

En la evolución de la producción anual de forraje de la rotación RIA-M R se observa una fuerte tendencia descendente en los primeros años, y una estabilización posterior en torno a las 25 t ha⁻¹ de MS. El descenso de la producción de la rotación es en parte debido a la reducción de la producción del maíz, y también, a las bajas producciones del RIA durante el tercer y cuarto año, el quinto año hay un repunte de las

producciones debido al mayor rendimiento del cultivo de invierno, ya que las producciones del maíz son las más bajas de los cinco años ensayados.

Con los datos de maíz incluidos dentro de la rotación RIA-M LC, obtenidos en estos ensayos se estableció una base de datos para proceder a la evaluación de diferentes versiones del modelo de crecimiento del maíz más comúnmente empleado: CERES-Maize. Además, se completó esta base de datos con la obtenida con una serie de ensayos complementarios. Estos ensayos complementarios consistieron en una segunda fecha de siembra realizada en los años 1998, 1999 y 2000: en 1998 sólo en R (condiciones no limitantes del medio); en 1999 y 2000, bajo condiciones R y S.

Con esta base de datos se procedió en primer lugar a evaluar tres versiones del modelo en condiciones hídricas no limitantes ((1) CERES-Maize-2003, la versión más reciente propuesta por Kiniry y colaboradores; (2) la versión incluida en el DSSAT V3.5 (software oficial) o CERES-3.5; y (3) la versión incluida en el DSSAT V4.0 o CERES-4.0 (software oficial; Jones *et al.*, 2003). A continuación, la versión con la que se obtuvieron los mejores resultados en estas condiciones (CERES-4.0) se evaluó en condiciones hídricas limitantes.

En la evaluación de las tres versiones citadas en condiciones no limitantes, se documentan y discuten las ecuaciones que causan las diferencias en las estimaciones de las principales variables entre las tres versiones. Con la versión CERES-4.0 se obtienen las mejores predicciones de producción de biomasa y grano en nuestras condiciones de cultivo. Con CERES-2003 se obtienen los peores resultados debido principalmente a que el 64 % de la MS translocada de los tallos al grano se pierde. Las razones por las que CERES-4.0 obtiene los mejores resultados están relacionadas con las nuevas funciones de temperatura que afectan a la eficiencia en el uso de la radiación (PRFT) y a la tasa de llenado del grano (RGFILL), que en la versión-4.0 son menos sensibles a la temperatura. Por otra parte, en nuestras condiciones de cultivo, las predicciones de CERES-4.0 mejorarían si las funciones PRFT y RGFILL fueran ligeramente más sensibles a la temperatura, aunque se precisaría de nuevos estudios, en un amplio rango de temperaturas, para confirmar esta hipótesis.

Bajo condiciones hídricas limitantes, CERES-4.0 obtiene unas simulaciones de biomasa y grano muy inferiores a los datos de campo. Se evalúan distintos aspectos del

modelo que consideramos responsables de estos resultados. Se emplean dos opciones de cálculo de la evapotranspiración (Priestley-Taylor (PT) y el método de referencia de Penman-Monteith (PFAO56; manual n° 56 de la FAO)) con dos valores del coeficiente (KEP) de reparto de la evapotranspiración entre la transpiración del cultivo y la evaporación del suelo (valor por defecto: $KEP = 0.685$; valor alternativo: $KEP = 0.500$). La opción PT con $KEP = 0.685$, infraestima sistemáticamente las producciones de biomasa y grano debido a una simulación demasiado temprana y elevada de las extracciones de agua. Las predicciones de biomasa y grano, tanto con la opción PT como con PFAO56 mejoran cuando se emplea un KEP de 0.500. PFAO56 es la opción de cálculo de la evapotranspiración con la que se obtienen las mejores predicciones. La opción PFAO-56 con $KEP = 0.500$ permitió obtener una estimación correcta de la biomasa aérea media en cosecha de los tratamientos de secano, pero las simulaciones siguieron dando valores de rendimiento de grano demasiado bajos. Esto es debido a la incapacidad del modelo para predecir correctamente el efecto del déficit hídrico sobre el número de granos. Se reevaluaron las funciones del modelo que estiman el número de granos por planta y se sustituyeron por las ecuaciones propuestas por Edmeades y Daynard, al resultar éstas más satisfactorias. Finalmente, se mejoraron las predicciones del modelo eliminando el efecto del factor de estrés hídrico de suelo que afecta a la fotosíntesis (SWFAC) sobre la tasa de crecimiento del grano (GROGRN). Estos cambios permitieron mejorar las simulaciones del número de granos y del peso medio de los granos de los tratamientos de secano. Por último, también se realizó un análisis de sensibilidad de diferentes cambios en las funciones de enraizamiento.

Capítulo 1

INTENSIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN FORRAJERA EN GALICIA

1.1. INTRODUCCIÓN

1.1.1. INTENSIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN FORRAJERA

La intensificación de la producción de forrajes, al aumentar la producción de forraje por unidad de superficie, permite incrementar las producciones ganaderas en regiones donde la superficie de las explotaciones es una limitante, y la tierra disponible para ampliarlas escasea. Con ello se consigue reducir el consumo de concentrados, que normalmente proceden de fuera de la explotación e incrementan los costes de producción reduciendo la viabilidad económica de la explotación. La intensificación del sistema de producción de forraje puede conseguirse mediante un buen manejo de la fertilización que elimine los factores limitantes relacionados con la nutrición del cultivo, el riego durante los períodos de déficit hídrico o la sustitución de sistemas de cultivo único (un cultivo por año) por sistemas de cultivo múltiple (dos cultivos por año), lo cual permite reducir los períodos en los que el suelo permanece sin cultivo.

Galicia es una región de eminente vocación ganadera y la producción de leche de vacuno domina el sector. Así, la producción láctea representa (datos del año 2001) el 33.0% de la producción final agraria y el 52.0% de la producción final del subsector ganadero (Xunta de Galicia, 2004).

En esta Comunidad Autónoma, el sector productor de leche de vacuno ha sufrido una intensa reestructuración desde la entrada de España en la Comunidad Económica Europea, con un acelerado proceso de reducción del número de explotaciones. Si en la campaña 1986-87 había en Galicia 111.6 mil explotaciones, en la campaña 1992-93 este número ya se había reducido a 70.1 mil y en la campaña 2001-02 tan solo quedaban 24.4 mil (Sineiro y Valdês, 1998; Xunta, 2004). Paralelamente a la reducción del número de explotaciones, se ha producido un incremento de la producción de leche, pasando de 1650 millones de litros en 1986 (MAPA, 1987) a 2314 millones de litros en 2002 (Xunta, 2004), debido a una clara intensificación en la producción láctea por vaca y explotación.

Sin embargo, no se ha producido una transferencia suficiente de tierras desde las

explotaciones que han desaparecido hacia las que perduran, con lo cual el incremento de la producción de leche se ha basado en buena parte en un aumento del consumo de concentrados. Esto ha supuesto un incremento en los costes medios de producción por litro de leche, siendo las explotaciones que utilizan una mayor proporción de forrajes en la ración del ganado las que obtienen un mayor margen neto por explotación (Barbeyto, 1997). Ante esta situación, Piñeiro y Pérez (1996) señalan que, en contra de la extensificación propugnada por la política agraria de la Unión Europea, en Galicia las explotaciones lácteas se ven abocadas a intensificar su producción forrajera para seguir siendo viables económicamente.

1.1.2. LAS ROTACIONES FORRAJERAS INTENSIVAS

En Galicia, el maíz (*Zea mays* L.) constituye el principal cultivo forrajero de verano con una superficie de 40186 ha en el año 2002 (Xunta, 2004), lo que representa el 47.6% del maíz forrajero cultivado en España (MAPA, 2003 y Xunta 2004), no figurando en las estadísticas las reducidas superficies de cultivo que se dedican a sorgo forrajero o girasol. Lloveras (1990) estudió el posible interés de otros cultivos forrajeros de verano como sustitutos del maíz, obteniendo unas producciones (promedio de tres años y dos localidades en Galicia) de 15.2 t de materia seca (MS) por ha para el maíz, 9.6 t ha⁻¹ para el girasol (*Helianthus annuus* L.), 7.8 t ha⁻¹ para el pasto de Sudán (*Sorghum sudanense* Piper Staff) y 9.9 t ha⁻¹ para el sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) × pasto de Sudán. Considerando que la digestibilidad *in vitro* de la materia seca del maíz es muy superior a la de los otros cultivos estudiados, las ventajas productivas del maíz respecto de los demás cultivos forrajeros de verano son muy claras y justifican su posición dominante en los sistemas de producción de Galicia.

El raigrás italiano (*Lolium multiflorum* L.) y los cereales de invierno como el trigo (*Triticum aestivum* L.), centeno (*Secale cereale* L.) o avena (*Avena sativa* L.), se han empleado en Galicia tradicionalmente como cultivos forrajeros de invierno. Los cultivares de raigrás italiano empleados son de tipo alternativo, los no alternativos se emplean como pratenses, bien solos o bien en forma de mezcla con otras especies de

gramíneas y leguminosas, para la obtención de elevadas producciones de forraje en praderas de corta duración (dos años). La inclusión de una leguminosa en estos cultivos permite incrementar el valor nutritivo del forraje al aumentar el contenido en proteínas, aunque dificulta la conservación del ensilado y frecuentemente también la recolección. En estudios realizados en Galicia, se observó que en las mezclas cereal + veza (*Vicia sativa* L.) a medida que aumenta la proporción de veza en la mezcla se incrementa el valor nutritivo del forraje pero la biomasa cosechable disminuye claramente debido al aumento del encamado. El cereal que sirve de tutor a la veza no es lo suficientemente robusto y se produce el vuelco (Castro *et al.*, 2000). Por otro lado, Lloveras (1986) estudió en Galicia la productividad de los cultivos forrajeros de invierno que permiten sembrar maíz forrajero a continuación y obtuvo las siguientes producciones de MS: 7.2 t ha⁻¹ (avena + veza); 5.1 t ha⁻¹ (centeno); 1.1 t ha⁻¹ (colza (*Brassica napus* L.)); 2.5 t ha⁻¹ (raigrás italiano alternativo). A la vista de estos resultados se podría pensar que avena + veza es una mezcla ampliamente utilizada en Galicia. No obstante, debido a los problemas de encamado con los cuales han tenido que enfrentarse los agricultores (Castro *et al.*, 2000), no es un cultivo apreciado por los mismos, por lo que su superficie es testimonial.

La siembra de varios cultivos por año, dos en general, en una misma superficie ha sido una práctica frecuentemente empleada para intensificar la producción de forrajes. Se trata de minimizar el tiempo en que el suelo se mantiene sin cultivo, maximizar la intercepción de radiación solar por los cultivos sucesivos y seleccionar las especies más adaptadas a cada período del año. Queda claro que para los períodos más fríos, las especies preferidas serán las de metabolismo fotosintético C₃ con baja temperatura base, mientras que en verano, con niveles de temperaturas y de radiación elevados, las especies C₄ serán más productivas. Diversos autores han estudiado las producciones de este tipo de rotaciones. Así, en Francia, Fleury (1974), Pontailier (1979), Raphalen (1980) y Raphalen y Bloc (1982), trabajando con la rotación maíz-raigrás italiano, obtuvieron producciones de MS en torno a 12.8 t ha⁻¹ de maíz y 2.7-4.9 t ha⁻¹ de raigrás. En Bélgica, Van Bockstaele *et al.* (1979) midieron incrementos de producción de 1.5-2.5 t ha⁻¹ de MS al pasar del monocultivo del maíz a cultivar maíz-raigrás. Por su parte, Murdock y Wels (1978) en Kentucky (EEUU) registraron incrementos de producción

entre 3-4 t ha⁻¹ de MS con sistemas de dos cultivos por año frente al maíz en monocultivo. Crookston *et al.* (1978) en Minesota (EEUU) observaron un incremento de 7.0 t ha⁻¹ de MS al pasar del maíz de monocultivo a maíz-centeno. En Wisconsin, Okoli *et al.* (1984) obtuvieron una producción de 15.0 t ha⁻¹ de MS con la rotación maíz-avena. Finalmente, en condiciones de regadío en Nuevo México (EEUU), Fuehring (1978) midió un incremento de producción de 11.4 t ha⁻¹ de MS entre el monocultivo de maíz y maíz-cebada (*Hordeum vulgare* L.).

Los estudios de Lloveras (1987) realizados en Galicia comparan durante cuatro años y en tres localidades la productividad de los siguientes sistemas de cultivo: maíz (monocultivo); maíz-centeno; maíz-avena+veza; maíz-raigrás italiano; maíz-raigrás italiano-colza (rotación de dos años); 2 años de pradera-maíz (rotación de tres años); pradera de corta duración y pradera de larga duración. Estos trabajos muestran que los sistemas de dos cultivos por año producen en torno a un 50% más de MS que los sistemas menos intensivos de praderas o maíz como cultivo único, obteniendo producciones medias anuales de MS de 11.2 t ha⁻¹ en praderas de larga duración, 11.8 t ha⁻¹ en praderas de corta duración, 18.6 t ha⁻¹ para la rotación avena+veza-maíz, 15.5 t ha⁻¹ para la rotación raigrás italiano-maíz y 13.2 t ha⁻¹ para la rotación raigrás italiano-maíz-colza.

Más tarde, también en Galicia, Piñeiro y Pérez (1997) compararon los sistemas de producción de forraje maíz-raigrás italiano, sorgo-raigrás italiano y praderas de raigrás italiano mezclado con trébol violeta (*Trifolium pratense* L.), resultando más productivos los dos primeros. Se midió un incremento de producción de 6.4 y 2.1 t ha⁻¹ al pasar de la pradera al maíz-raigrás italiano y al sorgo-raigrás italiano, respectivamente.

Cuando se siembran dos cultivos forrajeros por año, es recomendable realizar la siembra de otoño lo antes posible. Para el caso concreto del raigrás italiano, Piñeiro *et al.* (2001) indican la conveniencia de sembrar antes de que finalice el mes de septiembre. Con ello se consigue un buen establecimiento y crecimiento inicial porque aprovecha las temperaturas favorables de la primera parte del otoño. De este modo, se pueden conseguir dos cortes antes de tener que preparar el terreno para la siembra del cultivo de verano. No obstante la siembra temprana del raigrás se ve frecuentemente impedida por la fecha de recogida del maíz.

Otros autores indican otras ventajas en la introducción de un cultivo de invierno. Así, la mejora de la estructura del suelo asociada al empleo de un cultivo de invierno fue puesta de manifiesto por Tisdall y Oades (1979), Radford *et al.* (2001) y Hernawan y Bomke (1997), indicando este último trabajo un efecto más favorable de la implantación de raigrás frente al empleo de cebada o centeno. Lubet *et al.* (1993) en Bélgica y Zhou *et al.* (2000) en Canadá encontraron incrementos en la producción de grano, introduciendo raigrás durante el período invernal, frente al monocultivo del maíz. Por su parte, la disminución de las pérdidas por lixiviación de nitrógeno introduciendo un cultivo de invierno como cultivo de cobertera tras la cosecha del maíz ha sido estudiada por diversos autores como Shipley *et al.* (1992), Brandi-Dohrn *et al.* (1997), Møller y Djurhuus (1997), Dabney *et al.* (2001) y Baez *et al.* (2000). Este último trabajo fue realizado en la Cornisa Cantábrica y concluye que las pérdidas de nitrógeno por lixiviación se reducen en más de un 60% al introducir raigrás italiano en rotación con el maíz.

1.1.3. LABOREO CONVENCIONAL Y SIEMBRA DIRECTA

Los sistemas de no laboreo y mínimo laboreo fueron desarrollados en EEUU para tratar de solucionar los graves problemas de erosión eólica e hídrica ocasionados por la agricultura. Durante los años 50, el arado de vertedera comenzó a ser substituido por los arados cincel y de discos y a desarrollarse, aunque con poca aceptación, los primeros sistemas de mínimo laboreo. Al principio de los años 60, en el Cinturón del maíz, comenzaron los primeros agricultores a emplear un nuevo sistema de producción: el no laboreo (Philips y Young, 1979), sistema en el que se prescinde totalmente del laboreo del terreno. Todos estos sistemas se vieron en un primer momento limitados por la falta de herbicidas adecuados, lo que convertía a las malas hierbas en un importante factor limitante (Fernández-Quintanilla, 1997).

En otras regiones del mundo como Europa, donde la erosión eólica e hídrica no cobra la importancia de las zonas antes citadas, la introducción de sistemas de laboreo de conservación está en parte asociada al intento de reducir los costes de producción

(Cannell y Hawes, 1994) y también al apoyo de la Política Agraria Común a estos sistemas de cultivo (AEAC.SV, 2000)

En Galicia, y también en el resto de la España Húmeda, la introducción de sistemas de laboreo de conservación, se relaciona con la ya citada intensificación de la producción forrajera al facilitar la introducción de dos cultivos por año (Amiama Ares, 2003) ya que el tiempo disponible para la implantación de un cultivo tras la recolección del anterior es muy reducido, realizándose además en épocas del año de elevada pluviometría, lo que dificulta en buena medida las labores de cultivo.

El cultivo en condiciones de no laboreo ha sido ampliamente estudiado en muchos lugares del mundo, siendo el maíz una de las especies más estudiadas. Centrándonos en los cultivos forrajeros, los primeros ensayos de siembra sin laboreo de especies pratenses en España datan de 1964 (Pozo Ibáñez, 1967) y dieron resultados muy variables. En la España Húmeda, Sineiro (1977) realizó los primeros ensayos de implantación de pastos en terrenos de matorral (transformación de monte a pradera en Galicia) empleando técnicas de mínimo laboreo, no laboreo y laboreo convencional y obtuvo resultados similares con las tres técnicas de transformación. Más recientemente, Balza *et al.* (1994) sembraron con éxito en el País Vasco raigrás inglés (*Lolium perenne* L.) y trébol blanco (*Trifolium repens* L.) detrás de una pradera de festuca alta (*Festuca arundinacea* Schreb.), tras la aplicación de Glifosato 36% unos 83 días antes de la siembra. Estas mismas siembras sin tratamiento previo de herbicida, fueron ensayadas por Cruzado, también en el País Vasco, (Piñeiro, 1998). En este caso, las semillas germinaron pero no se consiguió su establecimiento debido a la competencia con la festuca. Piñeiro y Pérez (1995) estudiaron, obteniendo resultados positivos, el establecimiento de raigrás italiano alternativo sobre un alfalfar en su cuarto año de producción, tras aplicar Paracuat para controlar las malas hierbas que habían establecido a medida que el alfalfar perdía persistencia.

La siembra directa del maíz forrajero ha sido estudiada en Lugo. Los resultados obtenidos muestran que las producciones son equivalentes a las del laboreo convencional (Bueno, 1997). También en Lugo se han estudiado diversos sistemas de producción de raigrás italiano sin laboreo (Amiama Ares, 2003) y los resultados obtenidos ponen de manifiesto la viabilidad técnica y económica de los mismos.

Otro estudio realizado en dos localidades de Galicia (Piñeiro y Pérez, 1996) empleando la técnica de la siembra directa en dos rotaciones de dos cultivos por año (raigrás italiano alternativo como cultivo de invierno y maíz forrajero ó híbrido de sorgo × pasto de Sudán como segundo cultivo) no encontró diferencias significativas entre la siembra directa y la convencional en las producciones de raigrás italiano y sorgo. Por su parte, la producción de maíz forrajero en siembra directa no fue significativamente inferior en una de las localidades y si lo fue en la otra (30% inferior), lo que atribuyen a la naturaleza más pesada del suelo (textura franco-limosa). Bordegaray *et al.*, (1996) y Rodríguez *et al.*, (1996 y 1997) en ensayos realizados en Galicia y la Cornisa Cantábrica con los mismos cultivos encuentran sólo pequeñas diferencias productivas y económicas de la siembra directa frente al laboreo convencional.

En la actualidad EEUU es el país con una mayor implantación de los sistemas de laboreo de conservación, con más de un 63% de la superficie cultivada bajo alguno de estos sistemas en 1997 (ECAAF, 2000). En Europa la implantación es escasa (menos del 2% de la superficie cultivada), siendo Francia y España los dos países donde estas técnicas están más extendidas (ECAAF, 2000). La AEAC.SV (2002) en 2001, estima que se manejan bajo algún sistema de laboreo de conservación 1.1 millones de hectáreas de cultivos herbáceos. En Galicia, el maíz forrajero es el principal cultivo realizado con siembra directa y se apunta que en la actualidad la superficie sembrada con este método podría ser de unas 15000 ha (González Lemos, 2003).

1.1.4. EFECTO DEL DÉFICIT HÍDRICO: REGADÍO Y SECANO

El déficit hídrico es el principal factor limitante y normalmente el camino más efectivo para intensificar la producción de los cultivos (Sau *et al.*, 2002). La producción de biomasa y grano se reduce cuando estos se ven sometidos a un déficit hídrico. Esta reducción está asociada con el cierre estomático que provoca una disminución de la Eficiencia en el Uso de la Radiación (EUR) y con la reducción del índice de área foliar (IAF) que provoca un menor porcentaje de radiación solar interceptada por el cultivo

(Monteith, 1972; Karlen y Camp, 1985; Parvez *et al.*, 1989).

La influencia del sistema de siembra (convencional frente al no laboreo) sobre el déficit hídrico ha sido puesto de manifiesto por numerosos autores y se suele relacionar con la mayor conservación del agua del suelo observada en los sistemas de no laboreo. Ésta está bien documentada en diferentes regiones agrícolas (Blevins *et al.*, 1971; Jones *et al.*, 1969, Waggar y Denton, 1989) y se suele atribuir al efecto de pantalla de los residuos del cultivo que provoca una reducción de las pérdidas de agua por evaporación directa del agua del suelo (Munawar *et al.*, 1990; Dick *et al.*, 1991).

En Galicia el riego no es una práctica frecuente y hasta el momento está poco estudiada. Sin embargo, permite conseguir considerables incrementos de producción ya que durante los meses de verano se suele producir un importante déficit hídrico (Ruíz Nogueira *et al.*, 2001; López Cedrón *et al.*, 2002).

1.1.5. OBJETIVOS DEL CAPÍTULO PRIMERO

Los objetivos que se plantean en este Capítulo son los que se exponen a continuación:

1. Comparar la productividad de dos rotaciones forrajeras [(1) raigrás italiano alternativo-maíz ((RIA-M) 2 cultivos por año; rotación más intensiva); (2) raigrás italiano no alternativo ((RINA) 1 cultivo en dos años, pradera de corta duración; rotación menos intensiva)] bajo dos niveles de disponibilidad hídrica ((R) Regadío: agua no limitante; (S) Secano) siendo los nutrientes no limitantes, en el entorno edafoclimático de Lugo.
2. Estudiar el efecto de dos sistemas de siembra en la rotación RIA-M: (1) laboreo convencional (LC) y (2) siembra directa (SD).
3. Establecer una base de datos del cultivo del maíz en el interior de Galicia, obtenida en ensayos de campo, que permita evaluar y calibrar el modelo CERES-Maize para Galicia, tanto en condiciones de agua y nutrientes no limitantes (regadío) como en condiciones hídricas limitantes (secano) siendo los nutrientes no limitantes.

Para conseguir estos objetivos, se han llevado a cabo varios ensayos de campo en Lugo entre 1997 y 2002.

1.2. MATERIAL Y MÉTODOS

Se realizaron ensayos de campo durante 5 años consecutivos, desde septiembre de 1997 hasta octubre de 2002. Estos ensayos corresponden con los años agrícolas 1997/1998, 1998/1999, 1999/00, 2000/2001 y 2001/2002.

1.2.1. LOCALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS

El campo de ensayos se ubicó en la Finca de Prácticas de la Escuela Politécnica Superior (EPS) de la Universidad de Santiago de Compostela (USC) situada en Lugo (43°00' N; 7°30' O; 480 m de altitud).

El suelo de la parcela donde se realizaron los ensayos fue clasificado por el Departamento de Edafología de esta Universidad como “Umbrisol” (clasificación FAO 98) o “Humic Dystrudept” (clasificación USDA Soil Taxonomy 98). Las principales características del perfil del suelo están recogidas en la **Tabla 1**. Todos los horizontes del perfil tienen una textura franco-arenosa, con un contenido en arcilla en torno al 12% en los dos primeros horizontes, que llegan hasta los 40 cm de profundidad, y en torno al 7% en los horizontes siguientes. El pH en agua del suelo es próximo a 5.5. La parcela tiene una ligera pendiente (entre el 2% y el 2.5%) en dirección sudeste.

Tabla 1. Principales características del perfil del suelo de la parcela experimental (Finca de Prácticas de la Escuela Politécnica Superior de Lugo)

Horizonte	Profundidad (cm)	Carbono Orgánico (%)	pH	Densidad Aparente (g cm ⁻³)	Arcilla (%)	Limo (%)
A _{p1}	0-20	4.4	5.5	1.29	12.8	28.0
A _{p2}	20-40	2.9	5.5	1.31	10.9	14.8
BC	40-50	2.2	5.8	1.37	7.3	12.5
C	>50	1.9	5.8	--	7.2	8.2

1.2.2. CARACTERÍSTICAS METEOROLÓGICAS DE LOS AÑOS EXPERIMENTALES

En la **Tabla 2** se recoge el resumen de los datos meteorológicos de los años de ensayo. Los datos de temperaturas y precipitación se obtuvieron mediante una estación meteorológica automatizada, situada en las proximidades del ensayo, cuyos sensores estaban conectados a un “data logger” (Delta-T Logger de Delta-T Devices, Cambridge, Reino Unido). La estación suministra datos cada 30 minutos que posteriormente fueron procesados para obtener los datos diarios. La radiación global (RG) se estimó a partir del número de horas de sol medido en el Observatorio Meteorológico de Rozas (provincia de Lugo) que depende del Instituto Nacional de Meteorología, utilizando la ecuación de Ångström (Allen *et al.*, 1998). Los coeficientes de Ångström empleados [a (0.24) y b (0.53)] se obtuvieron por regresión lineal ($R^2 = 0.83$) con datos de horas de sol y RG medidos entre 1985 y 2000 en el observatorio de EL Alvedro (A Coruña) del Instituto Nacional de Meteorología. Estos coeficientes difieren poco de los que se recomienda emplear por defecto (a (0.25) y b (0.50); Allen *et al.*, 1998).

Tabla 2. Medias mensuales de la radiación solar global incidente diaria (RG), medias mensuales de la temperatura máxima ($T_{\text{máx}}$) y mínima ($T_{\text{mín}}$) diaria y precipitación mensual acumulada (P) registradas en la Finca de Prácticas de la EPS de Lugo en el período experimental (desde septiembre de 1997 hasta octubre de 2002)

Año 1997												
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
RG ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$)	-	-	-	-	-	-	-	-	12.6	7.2	3.7	3.0
$T_{\text{máx}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	-	-	-	-	-	-	-	-	24.6	20.2	13.3	11.0
$T_{\text{mín}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	-	-	-	-	-	-	-	-	12.1	11.0	7.0	3.7
P (mm)	-	-	-	-	-	-	-	-	39.6	182.2	215.8	133.0
Año 1998												
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
RG ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$)	5.6	9.6	13.4	12.7	19.2	20.4	21.1	20.0	12.6	8.9	4.6	3.5
$T_{\text{máx}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	11.8	15.7	16.9	12.5	19.2	22.5	23.7	27.4	22.2	17.3	15.5	10.5
$T_{\text{mín}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	4.0	1.9	4.9	5.0	8.2	10.2	12.7	14.2	12.3	8.3	7.0	0.5
P (mm)	71.0	28.8	56.0	327.6	72.8	13.2	38.0	16.8	106.4	25.6	48.4	50.1
Año 1999												
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
RG ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$)	4.9	8.4	12.1	15.5	17.0	21.1	21.6	19.7	13.0	8.7	6.2	4.1
$T_{\text{máx}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	11.2	11.3	14.0	15.7	18.7	20.6	26.0	24.8	21.6	17.1	12.2	10.3
$T_{\text{mín}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	2.2	0.5	3.0	4.9	8.7	10.6	13.9	12.9	12.0	8.9	3.8	3.0
P (mm)	90.8	55.6	128.5	108.1	81.6	18.2	6.0	59.0	163.4	175.4	70.6	139.2
Año 2000												
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
RG ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$)	6.8	7.1	13.2	11.1	17.3	22.4	19.9	19.7	14.6	8.4	4.2	3.0
$T_{\text{máx}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	9.9	13.7	15.7	12.2	19.2	24.4	23.1	25.3	24.0	16.8	12.0	12.3
$T_{\text{mín}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	-1.4	4.5	2.7	4.8	8.6	10.2	12.8	12.3	10.7	7.2	5.5	6.3
P (mm)	45.6	44.2	39.6	221.0	114.4	4.4	53.2	26.4	50.8	115.4	287.0	342.0
Año 2001												
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
RG ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$)	4.1	9.4	8.4	15.9	19.0	21.5	19.1	18.7	16.5	10.9	6.0	4.2
$T_{\text{máx}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	10.4	12.6	13.1	14.8	19.7	23.9	23.1	25.6	21.6	19.3	12.4	8.9
$T_{\text{mín}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	4.6	2.3	6.4	5.0	7.8	10.7	12.3	12.8	9.8	9.5	3.0	1.7
P (mm)	257.7	104.0	305.2	66.2	83.0	17.8	61.5	76.0	80.0	170.6	7.9	35.4
Año 2002												
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
RG ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$)	3.7	6.1	10.6	14.1	14.2	17.4	19.3	16.3	12.3	7.1	3.4	-
$T_{\text{máx}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	11.9	12.4	15.3	16.7	16.1	21.7	23.5	23.6	23.3	18.8	12.5	-
$T_{\text{mín}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	3.1	3.8	4.1	3.7	6.0	10.6	11.6	11.9	10.8	9.5	5.8	-
P (mm)	75.3	94.0	40.2	18.4	85.9	52.1	13.5	14.8	59.2	211.0	268.3	-

1.2.3. MATERIAL VEGETAL

Las especies y cultivares (cv.) empleados en los ensayos se describen a continuación:

- Raigrás italiano alternativo (RIA; *Lolium multiflorum* Lam.; cv. Promenade (tetraploide); producido y comercializado por Semillas Rocalba).
- Raigrás italiano no alternativo (RINA; *Lolium multiflorum* Lam.; cv. Exalta (diploide); producido y comercializado por Senasa).
- Maíz (M; *Zea mays* L.; cv. Clarica (ciclo FAO 200); producido y comercializado por Semillas Pioneer, SA).

Los tres son cultivares comerciales bien adaptados a la zona y representativos del material que habitualmente se emplea en siembras comerciales. Los cultivares de tipo alternativo se emplean como cultivo de invierno en rotación con una especie forrajera de verano, normalmente maíz, y los no alternativos se emplean como pratenses para la obtención de elevadas producciones de forraje y corta duración (dos años). El cultivar de maíz es un ciclo corto, bien adaptado a la climatología de la zona, con veranos frescos que impiden la introducción de ciclos más largos.

1.2.4. DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental se realizó para estudiar la rotación RIA-M en condiciones de agua no limitante (R (Regadío)) y en condiciones de secano (S). Se pretendió también estudiar esta rotación bajo dos sistemas de siembra (laboreo convencional (LC) y siembra directa (SD)). Por último, se incluyó el RINA, para contrastar las producciones de una rotación intensiva (RIA-M) frente a una pradera de corta duración.

Se aplicaron 6 tratamientos, que son el resultado de combinar los dos niveles de agua (R y S) y las tres rotaciones-sistema de siembra (RIA-M LC, RIA-M SD y RINA LC):

- RIA-M LC R: raigrás italiano alternativo-maíz con laboreo convencional en regadío.
- RIA-M LC S: raigrás italiano alternativo-maíz con laboreo convencional en secano.
- RIA-M SD R: raigrás italiano alternativo-maíz con siembra directa en regadío.
- RIA-M SD S: raigrás italiano alternativo-maíz con siembra directa en secano.
- RINA LC R: raigrás italiano no alternativo con laboreo convencional en regadío.
- RINA LC S: raigrás italiano no alternativo con laboreo convencional en secano.

Se empleó un diseño experimental en parcelas subdivididas (“Split-Plot”) con cuatro repeticiones, en el que la parcela principal correspondió al nivel de agua aplicada y la subparcela la combinación entre rotación y método de siembra empleado. Las dimensiones de todas estas parcelas elementales fueron de 12.0×7.0 m (84.0 m^2), o sea 16 líneas de 7 m de longitud, con 75 cm de separación entre líneas en el caso del maíz.

Para poder evaluar el efecto de la falta de agua en los cultivos sin interferencia de otros factores, se han mantenido todos los tratamientos en condiciones no limitantes tanto de fertilizantes como de densidades objetivo de plantas. Además se mantuvieron las parcelas libres de plagas y de enfermedades.

1.2.5. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS

1.2.5.1. SIEMBRA

1.2.5.1.1. PREPARACIÓN DEL TERRENO

En septiembre de 1997 se preparó el suelo de todo el campo de ensayo mediante laboreo convencional consistente en un pase cruzado de grada de discos, abonado de fondo y otro pase cruzado de grada.

Parcelas de laboreo convencional (LC)

Previamente a las siembras, en años sucesivos, se realizó un pase cruzado de cultivador y otro de fresadora, tanto en primavera (para la siembra del maíz) como en otoño (para la siembra del raigrás). En las parcelas en que se sembró el RINA, dado que es una pradera bianual, sólo se efectuaron estas operaciones en otoño de 1997, 1999 y 2001.

Parcelas de siembra directa (SD)

Lógicamente, en las parcelas destinadas a SD no se realizó ningún laboreo. Se aplicó un herbicida sistémico total (Glifosato 36%, a una dosis de 5 l ha⁻¹ de producto comercial). La aplicación del herbicida se realizó unos días (1-5) antes de la siembra, tanto en primavera (para la siembra del maíz) como en otoño (para la siembra del raigrás), con el fin de eliminar la vegetación existente en ese momento.

1.2.5.1.2. PROFUNDIDAD, DENSIDAD Y FECHAS DE SIEMBRA

Las siembras se realizaron de modo manual en las parcelas de LC. En el caso del raigrás las semillas se repartieron a voleo.

En las parcelas de SD las siembras se realizaron empleando una máquina de siembra directa que no incorpora el abono de establecimiento.

En cualquier caso las semillas de maíz quedaron enterradas a una profundidad de 5 cm.

Las densidades de siembra empleadas fueron las siguientes:

- RIA: 40 kg ha⁻¹ de semilla.
- RINA: 30 kg ha⁻¹ de semilla.
- Maíz: 200000 semillas ha⁻¹ con separación entre líneas de 75 cm y aclareo manual posterior para conseguir la densidad objetivo de 100000 plantas ha⁻¹.

Las fechas de siembra están recogidas en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Fechas de siembra de los cultivos en los años de ensayo

		Año 1997	Año 1998	Año 1999	Año 2000	Año 2001	Año 2002
Maíz	LC^b	-	14 mayo	24 mayo	18 mayo	19 mayo	8 mayo
	SD^b	-	15 mayo	24 mayo	18 mayo	19 mayo	9 mayo
RIA^a	LC^b	24 sept.	21 oct.	8 oct.	27 oct.	26 oct.	-
	SD^b	24 sept.	7 oct.	8 oct.	25 oct.	25 oct.	-
RINA^a		24 sept.	-	8 oct.	-	26 oct.	-

^aRIA: Raigrás italiano alternativo; RINA: Raigrás italiano no alternativo

^bLC: Laboreo convencional; SD: Siembra directa.

1.2.5.2. FERTILIZACIÓN

Con anterioridad al comienzo de los ensayos se realizó un análisis de suelo para determinar sus condiciones iniciales, y programar el abonado en función de estos resultados. De los resultados de los análisis se dedujeron unos adecuados niveles de nutrientes, por lo que los abonados se realizaron en función de las expectativas potenciales de cosecha sin considerar abonados de corrección. El porcentaje de aluminio de cambio era despreciable (1.0%), no representando ningún problema para la producción de los cultivos, por lo que se decidió aplicar 1000 kg ha⁻¹ de caliza cada dos años.

Las dosis aplicadas a cada cultivo en los diferentes años experimentales se describen a continuación.

Año 1997

- RIA y RINA: abonado de establecimiento de 60, 44 y 104 kg ha⁻¹ de N, P y K, respectivamente, así como una enmienda de 1000 kg ha⁻¹ de caliza en todas las parcelas.

Año 1998

- Maíz: abonado de establecimiento de 120, 26 y 133 kg ha⁻¹ de N, P y K, respectivamente, y en cobertera se aportaron 200 kg ha⁻¹ de N en el estadio de 7-9 hojas expandidas.
- RIA y RINA: abonado de establecimiento (RIA) y de mantenimiento (RINA) de 60, 44 y 104 kg ha⁻¹ de N, P y K, respectivamente.

Año 1999

- Maíz: abonado de establecimiento de 180, 39 y 179 kg ha⁻¹ de N, P y K respectivamente, que se complementaron con 210 kg ha⁻¹ de N. A partir de este año se aplicó nitrógeno complementario en el establecimiento de los tratamientos de secano, para evitar que quedase sin incorporar al suelo en el caso de que no lloviese suficientemente. En regadío se siguió aportando nitrógeno en cobertera en el estadio de 7-9 hojas expandidas, como ya se describió para 1998.
- RIA y RINA: *idem* que en 1997.

Año 2000

- Maíz: *idem* que en 1999.
- RIA y RINA: *idem* que en 1998.

Año 2001

- Maíz: *idem* que en 1999.
- RIA y RINA: *idem* que en 1997.

Año 2002

- Maíz: *idem* que en 1999.

Además en el caso del raigrás (tanto del RIA como del RINA) se realizaron diferentes aportaciones de N en cobertera que describimos a continuación: 60 kg ha⁻¹ en cobertera a la salida del invierno (febrero) y 60 kg ha⁻¹ tras cada corte (exceptuando en RIA el corte que precede la siembra del maíz y en RINA el corte que precede a la renovación tras dos años de permanencia de la pradera). En la **Tabla 4** se indica la cantidad total de abonado nitrogenado aportada cada año a los cultivos sucesivos. En la **Tabla 5** se muestra el número de cortes efectuado al raigrás en los años de ensayo. El criterio empleado para determinar la fecha de los diferentes cortes está descrito en 1.2.6.

Tabla 4. Cantidad total (kg ha⁻¹) de N aplicada cada año a los distintos cultivos

	Año 1997	Año 1998	Año 1999	Año 2000	Año 2001	Año 2002
MAÍZ		320	390	390	390	390
RIA^a	60	180	180	120	120	180
RINA^a						
R^b	60	420	360	360	300	360
S^b	60	300	120	180	300	300

^aRIA: Raigrás italiano alternativo; RINA: Raigrás italiano no alternativo

^bR: Regadío; S: Secano.

Tabla 5. Número de cortes efectuados al RIA y al RINA durante los años de ensayo

	Año 1997	Año 1998	Año 1999	Año 2000	Año 2001	Año 2002
RIA^a	1	2	2	1	1	2
RINA						
R^b	1	6	5	5	4	5
S^b	1	4	0	2	4	4

^aRIA: raigrás italiano alternativo; RINA: raigrás italiano no alternativo

^bR: regadío; S: secano.

El abonado de establecimiento fue incorporado mediante labores inmediatamente antes de la siembra del RIA y del maíz de LC. En SD se esparció en superficie. En el caso del RINA, el abonado de establecimiento se realizó en otoño, incorporándolo al suelo y el abonado de mantenimiento se realizó también en otoño, sin incorporación.

1.2.5.3. RIEGO

El sistema de riego empleado con el RINA fue la aspersión, mientras que con el maíz se empleó el goteo dada la dificultad que supone regar pequeñas parcelas con aspersores altos.

El riego se controló mediante el uso de tensiómetros. En el centro de cada parcela de regadío se colocaron tres tensiómetros, con la cápsula situada a una profundidad distinta. Además, se emplearon profundidades distintas en las parcelas de maíz (cultivo de enraizamiento profundo) y en las de RINA (cultivo de enraizamiento más superficial) (**Tabla 6**). Se regó cada vez que alguno de los tensiómetros marcaba lecturas inferiores a los umbrales indicados en la **Tabla 6**. Las parcelas de RIA no se regaron debido a que se cultiva en un período del año (Octubre-Abril) en el que no se produce déficit hídrico en esta zona de Galicia.

La dosis de agua aportada en cada riego permitió que el suelo volviera a capacidad de campo. Las dosis de agua totales aplicadas mediante riego en cada uno de los años experimentales están recogidas en la **Tabla 7**. Estos valores derivan del seguimiento directo del caudal de los goteros en el caso del maíz y de las lecturas de pluviómetros colocados en las parcelas de RINA.

Tabla 6. Profundidad de colocación de los tensiómetros y lecturas umbrales por debajo de las cuales se regó el maíz y el RINA, respectivamente

Profundidad (cm)		Umbral de lectura tensiométrica (cbar)	
Maíz	RINA ^a	Maíz	RINA ^a
35	25	-70	-60
50	35	De -50 a -60	De -40 a -50
60	-	De -30 a -40	-

^a RINA: Raigrás italiano no alternativo.

Tabla 7. Aportes totales de agua de riego (mm) en los años de ensayo

	Año 1998	Año 1999	Año 2000	Año 2001	Año 2002
Maíz	305	250	295	250	260
RINA ^a	300	185	285	227	245

^a RINA: Raigrás italiano no alternativo.

1.2.5.4. TRATAMIENTOS FITOSANITARIOS

Como se mencionó anteriormente, se trató de mantener los cultivos libres de plagas, enfermedades y malas hierbas de manera que no constituyesen un factor limitante para el desarrollo óptimo de los mismos. Para conseguirlo, bastó con las siguientes aplicaciones de herbicidas:

- 2.4 D (27.5%) + MCPA (27.5%): antes del primer corte del raigrás, a una dosis de 1 l ha⁻¹ de producto comercial para combatir las malas hierbas de hoja ancha emergidas tras la siembra. Se efectuaron en 1997, 1998 y 1999 excepto en las parcelas de SD sembradas en los otoños de 1998 y 1999 que no tuvieron prácticamente malas hierbas.
- Glifosato (36%): en las parcelas de SD, tanto antes de la siembra del maíz como del raigrás, a una dosis de 5 l ha⁻¹ de producto comercial como ya se ha indicado.

- Alacloro (35%) + Atracina (20%): a una dosis de 5 l ha⁻¹ de producto comercial en preemergencia en todas las parcelas de maíz.

1.2.6. EVOLUCIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA Y DISTRIBUCIÓN DE LA MATERIA SECA ENTRE LOS DIFERENTES ÓRGANOS. FECHAS DE COSECHA

Durante los tres primeros años de ensayo, para seguir la evolución temporal de la producción de biomasa de los cultivos se realizaron muestreos periódicamente (cada 15 días; cada 30 días, excepcionalmente en el caso del raigrás, en los períodos de menor crecimiento vegetativo del cultivo) a lo largo del ciclo de los mismos y en las cosechas, en todas las parcelas elementales. Los dos últimos años sólo se realizaron muestreos de cosecha.

Los muestreos tuvieron las siguientes características:

- Raigrás: Muestreos de 0.25 m²/parcela a lo largo del ciclo (seguimiento de la curva de crecimiento). Se cosecharon 12 m²/parcela cada vez que la hierba superó los 50 cm de altura, siendo la altura de corte de 5 cm por encima del nivel del suelo. Con esto se pretendía imitar la acción de la segadora.
- Maíz: Muestreos de 0.50 m²/parcela (correspondientes a 0.66 m lineales de una línea de cultivo) a lo largo del ciclo (seguimiento de la curva de crecimiento). La cosecha se realizó con el grano en estado pastoso-duro (estadio de cosecha recomendado para el ensilado, línea de leche entre 1/4 y 1/2). El muestreo de cosecha era de 6 m²/parcela. Las plantas se recolectaban enteras, cortadas a nivel del suelo.

Con el objeto de estimar la biomasa aérea total y su distribución entre los diferentes órganos de las plantas se procedió como se indica a continuación:

- Raigrás: Se separaron tallos, hojas verdes y hojas amarillas de las plantas de las submuestras.
- Maíz: Se separaron tallos, vainas foliares, hojas verdes, hojas amarillas, zuros, espatas, pedúnculos y grano de todas las plantas de las muestras.

Para determinar el peso de la materia seca cosechada se procedió al secado, durante más de 48 horas hasta alcanzar peso constante, del material vegetal previamente separado, en una estufa de ventilación forzada a 70 °C.

En los muestreos de cosecha del maíz se realizó un conteo de plantas en la superficie muestreada y se determinó el peso seco de 1000 semillas.

Las fechas de cosecha del maíz y cortes del raigrás fueron las siguientes:

Año 1997

- RIA: 12 de diciembre.
- RINA: 12 de diciembre.

Año 1998

- Maíz: 22 de septiembre.
- RIA: 11 de marzo; 22 de abril.
- RINA-R: 11 de marzo; 7 de mayo; 11 de junio; 14 de julio; 2 de septiembre; 4 de noviembre.
- RINA-S: 11 de marzo; 7 de mayo; 11 de junio; 14 de julio.

Año 1999

- Maíz: 30 de septiembre.
- RIA: 5 de abril; 7 de mayo.
- RINA-R: 15 de marzo; 7 de mayo; 24 de junio; 26 de julio; 17 de septiembre.
- RINA-S: -.

Año 2000

- Maíz R: 4 de octubre.
- Maíz R: 25 de septiembre.
- RIA: 3 de mayo.
- RINA-R: 3 de mayo; 12 de junio; 20 de julio; 23 de agosto; 23 de octubre.
- RINA-S: 3 de mayo; 12 de junio.

Año 2001

- Maíz: 26 de septiembre.
- RIA: 26 de abril.
- RINA-R: 26 de abril; 6 de junio; 19 de julio; 13 de septiembre.
- RINA-S: 26 de abril; 6 de junio; 19 de julio; 13 de septiembre.

Año 2002

- Maíz: 1 de octubre
- RIA: 4 de marzo; 25 de abril.
- RINA-R: 4 de marzo; 25 de abril; 11 de junio; 22 de julio; 13 de septiembre.
- RINA-S: 4 de marzo; 25 de abril; 11 de junio; 22 de julio.

1.2.7. PROCESADO DE LOS DATOS Y ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

El procesado de los datos se realizó empleando la hoja de cálculo Excel 2000 para Windows 98.

El análisis estadístico se hizo con la aplicación SAS versión 8.00 para Windows 98. Se realizó el análisis de la varianza y la comparación de medias mediante el test de Duncan.

El modelo empleado para el análisis de la varianza y la comparación de medias fue el siguiente:

```
linesize=80 pagesize=60;
data a;
input bloq aug alt var;
cards;
proc anova;
  class bloq aug alt;
  model var=bloq aug bloq*aug alt aug*alt;
  test h=aug e=bloq*aug;
  test h=bloq e=bloq*aug;
  means aug/duncan e=bloq*aug;
  means alt /duncan;
  means aug*alt / duncan;
run;
```

Donde bloq = bloque; aug = nivel hídrico aplicado (R, S)); alt = rotación-sistema de siembra (RINA, M-LC, M-SD) y var = variable a analizar.

1.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se presentan y discuten los resultados obtenidos en los ensayos de campo. En la **Tabla 8** se indican las producciones anuales totales de materia seca (t ha^{-1}) de los diferentes tratamientos, mientras que en la **Tabla 9** se presentan las producciones anuales de materia seca (t ha^{-1}) de los dos componentes de la rotación raigrás italiano alternativo-maíz (RIA-M).

En el análisis de los resultados estudiaremos en primer lugar cada uno de los cultivos por separado, para considerar a continuación las rotaciones en su conjunto.

1.3.1. PRODUCCIÓN DE BIOMASA DEL RAIGRÁS ITALIANO NO ALTERNATIVO (RINA)

En la **Tabla 8** se muestran las producciones anuales de materia seca (MS) del RINA de los cinco años agrícolas experimentales. Las producciones de las parcelas de RINA regadas superaron a las de secano en un 30% durante el primer año. Las diferencias de producción se registraron a partir del final de la primavera (**Fig. 1**), al producirse un elevado déficit hídrico durante el verano del primer año experimental (1997-1998). Durante el verano de 1998, el RINA del tratamiento de secano se secó completamente debido a la combinación del déficit hídrico con el estrés de temperatura (**Tabla 2**). Se trata de un efecto frecuente en las zonas de Galicia con veranos relativamente cálidos y con escasez de lluvias, en las que el RINA puede comportarse como un cultivo anual, desapareciendo con el paso del primer verano, tras la siembra en el otoño anterior (Piñeiro *et al.*, 2001).

Durante el tercer año, tras la renovación de las parcelas el 8 de octubre de 1999, la producción del RINA regadío (R) duplicó a la del RINA secano (S). A pesar de que la sequía fue más precoz en el 2000 que en 1998 el verano del tercer año el RINA del tratamiento S consiguió superar el verano, lo cual permitió el rebrote otoñal en el cuarto año. Las temperaturas y precipitaciones de julio-agosto (**Tabla 2**) fueron ligeramente

inferiores y superiores, respectivamente, lo cual pudo favorecer la mayor tasa de supervivencia de la pradera. No obstante la pradera quedó muy debilitada y el cuarto año la producción en R superó a la de S en un 85%, a pesar de que el verano fuera relativamente lluvioso (**Tabla 2**). Durante el quinto año se renovó de nuevo la pradera (26 de octubre de 2001) y las producciones en regadío fueron superiores a las de secano en un 34%. Durante este año, junio fue lluvioso pero las precipitaciones de julio-agosto fueron escasas (**Tabla 2**).

Tabla 8. Producción total de materia seca (t ha^{-1} ; acumulación de biomasa de los sucesivos cortes realizados a 5 cm) de los diferentes tratamientos durante los años de ensayo (desde septiembre de 1997 hasta octubre de 2002)

	Sept 97-Sept 98	Oct 98-Sept 99	Oct 99-Sept 00	Oct 00-Sept 01	Oct 01-Oct 02
RINA^a					
Regadío	20.45	15.10	15.84	12.01	15.04
Secano	15.74	0.00	7.85	6.51	11.25
RIA-Maíz LC^a					
Regadío	33.08	29.17	26.26	24.03	27.48
Secano	24.02	21.99	21.00	22.23	19.12
RIA-Maíz SD^a					
Regadío	33.50	31.59	24.74	24.24	25.57
Secano	22.71	23.64	18.13	20.68	19.32
Valores medios					
RINA^a	18.09 b	7.55 c	11.84 c	9.26 b	13.14 b
RIA-Maíz LC^a	28.55 a	25.58 b	23.63 a	23.13 a	23.30 a
RIA-Maíz SD^a	28.11 a	27.61 a	21.43 b	22.46 a	22.45 a
Regadío	29.01 a	25.28 a	22.27 a	20.09 a	22.70 a
Secano	20.82 b	15.21 b	15.66 b	16.47 b	16.56 b
Análisis estadístico					
Rotación (Ro)	***	***	***	***	***
Riego (R)	***	***	***	*	***
Interacción (Ro × R)	***	***	NS	NS	**
CV^b (%)	4.34	5.61	7.34	10.12	5.90

^aRINA: Raigrás italiano no alternativo; RIA: Raigrás italiano alternativo; LC: Laboreo convencional; SD: Siembra directa

^bCV: Coeficiente de variación

*, **, ***: Diferencias significativas al 5%, 1% y 1 % respectivamente; NS: Diferencia no significativa

Los valores seguidos de la misma letra dentro de una misma columna no presentan diferencias significativas.

Tabla 9. Producción anual de materia seca (t ha^{-1}) de los dos componentes de la rotación RIA-Maíz^a (cortes de RIA realizados a 5 cm; maíz cortado a ras de suelo)

	Sept 97-Sept 98		Oct 98-Sept 99		Oct 99-Sept 00		Oct 00-Sept 01		Oct 01-Oct 02	
	RIA ^a	Maíz	RIA ^a	Maíz	RIA ^a	Maíz	RIA ^a	Maíz	RIA ^a	Maíz
RIA-Maíz LC^a										
Regadío	7.39	25.69	5.10	24.06	2.74	23.52	3.18	20.84	6.82	20.65
Secano	7.39	16.63	6.29	15.69	3.93	17.07	3.15	19.08	6.80	12.31
RIA-Maíz SD^a										
Regadío	7.51	25.99	8.14	23.44	4.20	20.54	2.98	21.26	5.32	20.25
Secano	7.28	15.43	9.57	14.06	4.97	13.16	3.96	16.71	6.39	12.93
Análisis estadístico										
Sistema de siembra (S)	NS	NS	***	*	**	**	NS	NS	NS	NS
Riego (R)	NS	***	NS	***	NS	**	NS	*	**	***
Interacción (S × R)	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	*	NS	NS
CV^b (%)	4.34	6.40	11.16	4.72	16.32	7.21	16.61	5.76	13.61	5.66

^aRIA: Raigrás italiano alternativo; LC: Laboreo convencional; SD: Siembra directa^bCV: Coeficiente de variación

*, **, ***: Diferencias significativas al 5%, 1% y 1 % respectivamente; NS: Diferencia no significativa

Los valores seguidos de la misma letra no presentan diferencias significativas.

La **Fig. 1** representa la evolución de la biomasa aérea acumulada del RINA durante los tres primeros años experimentales. En 1997-1998 se observó, como era esperado, un crecimiento lento en otoño y prácticamente una parada en el invierno. El crecimiento otoñal fue lento debido al bajo índice de área foliar (IAF), mientras que durante el invierno, si bien fue muy reducido, no llegó a detenerse ya que el raigrás es capaz de tener un cierto desarrollo con temperaturas incluso próximas a los 0 °C (Nelson, 1995). Durante la primavera, la combinación de un IAF suficiente para interceptar un porcentaje elevado de la radiación solar incidente y temperaturas más cercanas a las óptimas para la fotosíntesis, permiten que la tasa de crecimiento del cultivo aumente alcanzando sus valores máximos. Para este cultivo la fotosíntesis neta a saturación de luz tiene su óptimo en torno a 25 °C (Griffith y Chastain, 1997). La acumulación de biomasa empezó a frenarse, incluso en regadío, a principios de julio debido a temperaturas superiores a las óptimas para este cultivo C₃. El hecho de ser la temperatura media de las máximas del mes de julio de 23.7 °C, puede ser un indicador de que la temperatura óptima para la fotosíntesis neta es algo inferior a 25 °C.

En secano la reducción de las tasas de crecimiento empezó antes, durante el mes de junio, debido a una combinación de déficit hídrico y exceso de temperatura. A partir de mediados de julio de 1999, la falta de agua fue lo suficientemente severa como para detener el crecimiento y provocar la muerte de las plantas. Al no haber rebrote en otoño, la producción de secano del año siguiente fue nula como se indicó anteriormente (**Fig. 1**). Por su parte, en regadío el crecimiento otoñal registrado fue superior al del año precedente, debido probablemente al mayor IAF de la pradera, pero la producción de forraje total fue inferior a la del año anterior (**Fig. 1**). Tanto en praderas de raigrás inglés como de RINA se suele producir una reducción de la producción de forraje el segundo año (Juan Piñeiro, comunicación personal). Esta reducción se suele atribuir tanto a factores ambientales (disminución de la oxigenación del suelo), como a la disminución de la población de plantas (persistencia) o al envejecimiento de estas.

La resiembra en el otoño de 1999, al estar condicionada por el cultivo precedente y la climatología, fue más tardía (8 de octubre) que la siembra de 1997 (24 de septiembre). Esto provocó que la entrada en producción fuera mucho más lenta que en la siembra de 1997, debido a unas temperaturas de establecimiento más bajas y por

tanto menos favorables. El arranque más lento del cultivo fue el principal responsable de que las producciones del año 99-00 fueran mucho más bajas que las del 97-98. Además, en el secano el déficit hídrico fue más precoz, al detectarse ya a principios de junio. Sin embargo, como ya se mencionó, en este caso las parcelas de secano rebrotaron con las lluvias otoñales, probablemente porque las temperaturas fueron ligeramente inferiores y las precipitaciones mayores en julio-agosto de 2000 que en 1998, con lo cual las producciones no fueron nulas el cuarto año.

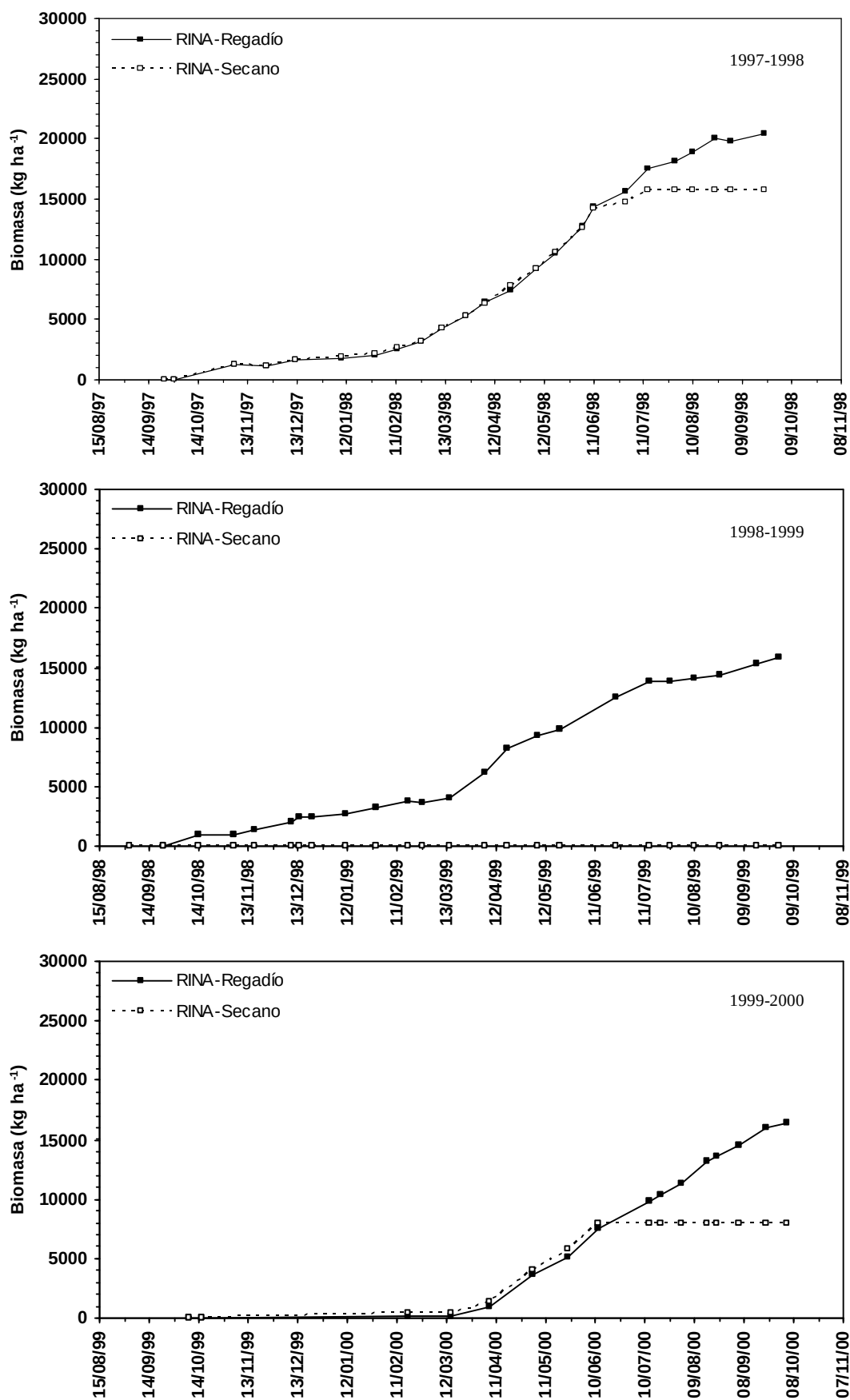


Fig. 1. Evolución de la biomasa aérea acumulada (acumulación de biomasa de los sucesivos cortes realizados a 5 cm) por el raigrás italiano no alternativo (RINA) durante las campañas 97-98, 98-99 y 99-00. Los puntos son medias de cuatro repeticiones.

1.3.2. PRODUCCIÓN DE BIOMASA DEL RAIGRÁS ITALIANO ALTERNATIVO (RIA)

A partir del otoño de 1998, segundo año experimental, cuando se comenzaron a aplicar los tratamientos de siembra directa (SD) al RIA, las producciones de los tratamientos SD fueron significativamente superiores a las de laboreo convencional (LC) (un 55% y 35% superiores en el segundo y tercer año, respectivamente) (**Tabla 9**). En el segundo año esto puede deberse a que las parcelas LC se sembraron 14 días más tarde, y a que las parcelas SD no recibieron herbicidas (2.4 D+MCPA) ni en el segundo ni en el tercer año. Al no remover el suelo tras el cultivo de verano, emergieron limpias de malas hierbas, mientras que fue necesario utilizarlos en los tratamientos LC. En los años cuarto y quinto, al ser las fechas de siembra similares y no ser necesaria la aplicación de 2.4 D+MCPA, no se encontraron diferencias significativas entre sistemas de siembra, lo que coincide con los resultados obtenidos por otros investigadores en Galicia (Piñeiro y Pérez, 2000), y en la Cornisa Cantábrica (Rodríguez *et al.*, 1996). No obstante, estos resultados difieren de los obtenidos por Amiama Ares (2003), en la provincia de Lugo, en un suelo con mayor porcentaje de arcilla, en los que los tratamientos LC fueron más productivos que los SD.

Se pudo comprobar *de visu* que, en general, el establecimiento del RIA fue mejor en las parcelas de SD, debido a que las lluvias otoñales suelen impedir que el suelo se encuentre en el tempero adecuado para una buena preparación de la siembra mediante LC. No obstante, el retraso de las lluvias de otoño observado en el último año experimental (2001-2002), permitió el buen establecimiento de las parcelas LC, observándose por el contrario un retraso en el crecimiento de las parcelas SD, posiblemente debido a un mayor efecto residual en SD que en LC del herbicida (Alacloro+Atracina) aplicado al maíz.

Por otro lado, las producciones de RIA precedidas por Maíz seco (S), resultaron superiores (20%, 28%, 15% y 9% en el segundo, tercer, cuarto y quinto año, respectivamente) a las de RIA precedidas de Maíz regadío (R), aunque estas diferencias sólo fueron significativas el último año (**Tabla 9**). Estas diferencias parecen ser consecuencia de la mayor extracción de nutrientes asociada a la mayor producción de

Maíz R respecto de Maíz S. No obstante, las dosis de abonado aplicadas fueron más que suficientes para cubrir las extracciones del cultivo en N, P y K.

Los rendimientos medios de RIA en los cinco años estudiados se situaron en 5.05, 5.51, 5.63 y 6.43 (LC R, LC S, SD R y SD S respectivamente) t ha⁻¹ de MS, valores superiores a las 4 t ha⁻¹ de MS obtenidas como promedio por Lloveras (1987 y 1990), que estudió en Galicia los cultivos forrajeros de invierno para rotaciones intensivas con maíz, y también superiores a las conseguidas en el sistema RIA-M en Francia y Bélgica (Pieters, 1981; Raphalen, 1980). Otro estudio realizado también en zona costera de Galicia (Piñeiro *et al.*, 2001) indica producciones más altas de RIA (7.5 t ha⁻¹ de MS para siembras realizadas el 15 de octubre y último corte a finales de abril), aunque el cultivo no se incluía dentro de una rotación.

Comparándolas con las producciones de otros cultivos forrajeros de invierno incluidos dentro de rotaciones intensivas de dos cultivos por año, la producción de MS de RIA en nuestros ensayos supera a la de centeno y colza obtenidas por Lloveras en Galicia (1987, 1990) y se sitúa en valores similares a los encontrados por el mismo autor para la veza-avena. Nuestras producciones son similares o superiores a las conseguidas con centeno después de maíz en Bélgica (Murdock y Wells, 1978) y con avena después de maíz en Estados Unidos (Pieters, 1981), si bien inferiores a las encontradas en Nueva Zelanda para la misma rotación (Hughes, 1985).

En la **Fig. 2** se representa la evolución de la biomasa aérea acumulada por los diferentes tratamientos del RIA durante los tres primeros años. En el año 1997-1998 no se observaron diferencias entre tratamientos, ya que todas las parcelas partían de condiciones idénticas y el sistema de siembra fue el laboreo en todos los casos. Este año se produjo un crecimiento otoñal mayor que en los restantes, al no verse condicionada la fecha de siembra por el cultivo anterior y realizarse unos 18 días antes que en el resto de los años (**Tabla 3**). De modo parecido a lo comentado anteriormente para el raigrás italiano no alternativo (RINA), el cultivo pudo aprovechar las temperaturas más suaves del comienzo del otoño. Weihing (1963) describe la relación entre la temperatura media diaria y la tasa de crecimiento del RIA, demostrando que el crecimiento del cultivo se detiene cuando la temperatura media baja de 6 °C, incrementándose desde este valor hasta alcanzar el óptimo cuando la temperatura media llega a los 18 °C. Además, como

ya se ha citado al hablar del RINA, la fotosíntesis neta alcanza su valor óptimo a una temperatura de 25 °C y una temperatura base de 5 °C (Griffith y Chastain, 1997), lo que explica, junto con la mayor duración del ciclo de cultivo, las mayores producciones alcanzadas este año. Piñeiro *et al.* (2001) señalan la conveniencia de sembrar antes de que finalice el mes de septiembre. Otros autores (Craigmiles y Weilhing, 1971; Kee *et al.*, 1995), aunque en diferentes condiciones edafoclimáticas, también sugieren como fecha de siembra más adecuada para este cultivo las últimas semanas del mes de septiembre y el comienzo de octubre. Siembras anteriores a estas fechas pueden tener problemas de germinación debido a la ausencia de humedad en la superficie del terreno y en siembras posteriores (como es nuestro caso a partir del segundo año) las producciones se pueden ver reducidas por las temperaturas más frías que frenarán la evolución fenológica de los primeros estadios de desarrollo y la acumulación de biomasa.

En los años 98-99 y 99-00 se registraron, como ya se ha comentado, mayores producciones en los tratamientos SD y para un sistema de siembra determinado, las mayores producciones se obtuvieron en las parcelas donde el maíz no se regó (S). En estos años no se observa el crecimiento otoñal indicado en el primer año experimental, especialmente en el año 99-00, en el que, al igual que en el caso del RINA, la entrada en producción fue muy lenta, probablemente debido a las bajas temperaturas, lo que explicaría las bajas producciones obtenidas este año con este cultivo (**Fig. 2**). Tras una lenta acumulación de biomasa durante el invierno (especialmente en 99-00), se detectó una fase de mayor crecimiento a partir del mes de marzo hasta el momento en el que se realiza el último aprovechamiento (principios de mayo) previo a la siembra del maíz.

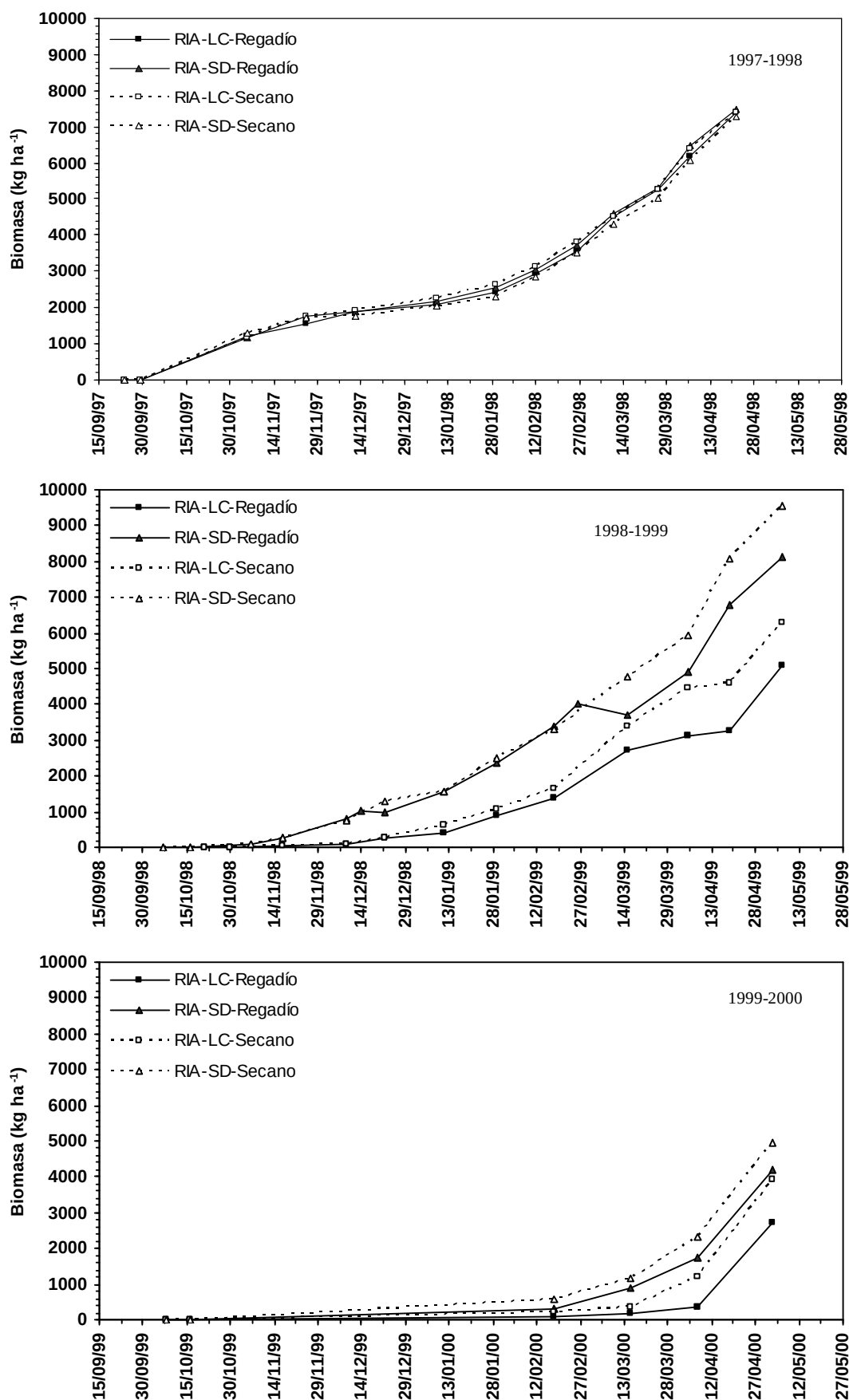


Fig. 2. Evolución de la biomasa aérea acumulada (acumulación de biomasa de los sucesivos cortes realizados a 5 cm) por el raigrás italiano alternativo (RIA) en laboreo convencional (LC) y siembra directa (SD) durante las campañas 97-98, 98-99 y 99-00. Los puntos son medias de cuatro repeticiones.

1.3.3. MAÍZ

1.3.3.1. PRODUCCIÓN DE BIOMASA

Las producciones de los tratamientos de regadío (R) de maíz forrajero superaron ampliamente a los de secano (S) (una media de 61%, 60%, 46%, 18% y 62% en 1998, 1999, 2000, 2001 y 2002, respectivamente) (**Tabla 9**). El verano del año 2001 fue el más lluvioso de los cinco años (**Tabla 2**), lo que se refleja en la menor respuesta del rendimiento al riego.

En el primer año (1998), no se encontraron diferencias de producción atribuibles al sistema de siembra. En los dos años experimentales siguientes, las producciones fueron significativamente superiores en los tratamientos de laboreo convencional (LC; 6% y 20% en 1999 y 2000, respectivamente) que en los de siembra directa (SD) (**Tabla 9**). Finalmente, en los dos últimos años experimentales (2001 y 2002) no se detectaron diferencias significativas atribuibles al sistema de siembra empleado. También Piñeiro y Pérez (2000), en otras localidades de Galicia, obtuvieron producciones inferiores con SD que con LC. Sin embargo, observaron que las diferencias se acentuaban con el paso de los años, tendencia que no se detectó en nuestros ensayos. Piñeiro y Pérez (1996) indican que las mayores diferencias entre sistemas de siembra se dan en los suelos más pesados, por lo que no recomiendan el empleo de SD en estas condiciones, sin embargo la consideran una alternativa válida en condiciones de texturas más favorables como puede ser el caso de nuestros ensayos.

Mención especial merece la evolución con el paso de los años de las producciones del maíz en regadío, que pese a encontrarse en unas condiciones teóricamente no limitantes de nutrientes han mantenido una fuerte tendencia descendente en los primeros años, para estabilizarse posteriormente en torno a las 20-21 t ha⁻¹ de MS (**Tabla 9** y **Fig. 3**).

Un estudio realizado en Francia sobre el efecto a largo plazo (más de 21 años) del monocultivo de maíz sobre la producción de grano (Lubet *et al.*, 1993), indica un progresivo incremento de las producciones, que los autores atribuyen a la mejora genética de las variedades empleadas. Por otro lado, Lubet *et al.* (1993) comparan los

rendimientos de tres rotaciones en las que el maíz es el cultivo principal: maíz en monocultivo, maíz en rotación anual con raigrás y monocultivo de maíz (4 años) + pradera temporal (3 años). Observan que la inserción del raigrás como cultivo de invierno incrementa de modo significativo (6.5% aprox.) las producciones del maíz cuando se comparan con las del monocultivo. Este incremento es incluso mayor (en torno a un 8.5%) en el caso de la rotación con pradera temporal de 3 años. Estos resultados están en consonancia con la revisión bibliográfica de Englehorn *et al.* (1964) realizada en Estados Unidos y otros estudios posteriores realizados también en ese país: Barnhart *et al.* (1978) en Iowa durante 19 años, Hooker *et al.* (1983) en Kansas durante 14 y 21 años y Grove y Blevins (1988) en Kentucky durante 16 años.

Todo ello induce a descartar que la causa del descenso en las producciones de maíz encontrada en nuestros ensayos sea la intensificación productiva que supone el cultivo de invierno.

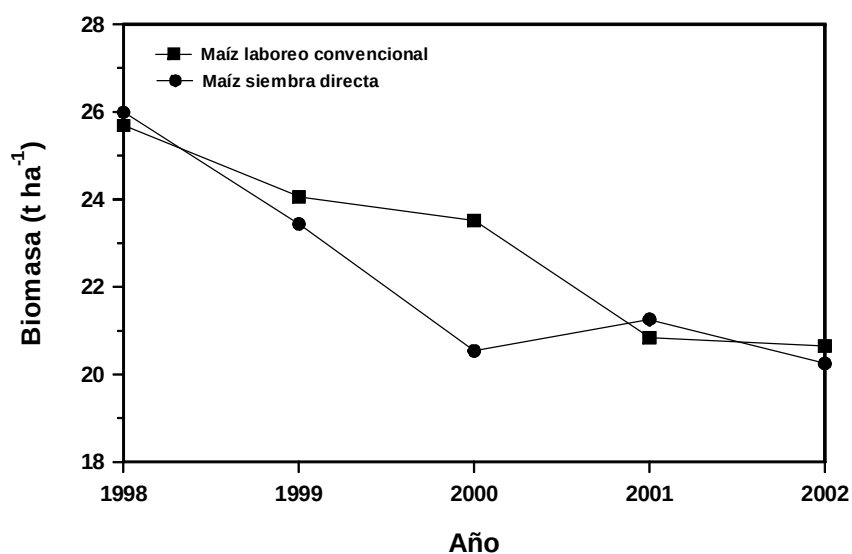


Fig. 3. Evolución de la producción anual de biomasa de maíz en regadío durante los 5 años de ensayo. Los puntos son medias de cuatro repeticiones.

En el análisis estadístico que se muestra en la **Tabla 10**, considerando las producciones medias de biomasa de maíz (LC y SD; R y S) en los cinco años ensayados, y considerando un “split-plot” en el tiempo, se observa que el factor tiempo

tiene un efecto significativo sobre la variable estudiada con una clara tendencia a la disminución con el paso de los años. Las diferencias entre las producciones de los cinco años, han sido significativas. No obstante, para poder concluir que las producciones de los tratamientos de regadío se reducen con el paso de los años en esta rotación, sería conveniente realizar un nuevo ensayo de larga duración, en el que la rotación estudiada (RIA-M) se iniciara en años sucesivos en los distintos tratamientos.

Tabla 10. Biomasa aérea de maíz en cosecha (media de los cuatro tratamientos ensayados; t ha⁻¹)

Valores medios		(t ha ⁻¹)
Maíz 1998		20.94 a
Maíz 1999		19.32 b,c
Maíz 2000		18.56 c
Maíz 2001		19.47 b
Maíz 2002		16.53 d
Análisis estadístico		
Año		***
CV ^a	(%)	6.14

^a CV: Coeficiente de variación

*: Diferencias significativas al %

Los valores seguidos de la misma letra no presentan diferencias significativas.

La reducción de la producción ha sido más acentuada en los primeros años en los tratamientos SD (**Tabla 9**), lo que parecía confirmar resultados anteriores de Piñeiro y Pérez (2000) que lo atribuyeron a un aumento paulatino de la compactación del suelo en las parcelas SD. Sin embargo, a partir del cuarto año, las producciones son muy similares para ambos sistemas de siembra.

Considerando las producciones medias de los cinco años estudiados, se situaron en 22.95, 16.16, 22.30 y 14.46 t ha⁻¹ de MS (LC R, LC S, SD R y SD S, respectivamente). En condiciones de secano, estos valores son similares o superiores a los obtenidos por otros autores en distintas localidades de Galicia (12 t ha⁻¹ de MS en monocultivo y 12.4 t ha⁻¹ en rotación anual (Lloveras, 1987); 15-17 t ha⁻¹ de MS en monocultivo (Lloveras, 1988)) y también similares o superiores a los conseguidos por el maíz (siempre en condiciones de secano) en otras zonas. En el oeste de Francia, Pontailier (1979), Raphalen (1980) y Raphalen y Bloc (1982), en el sistema maíz-raigrás italiano obtienen producciones de 13 t ha⁻¹ de MS. En Bélgica, Van Bockstaele *et al.* (1979) señalan

rendimientos de 13-14 t ha⁻¹ de MS para el maíz en rotación con raigrás. En Nueva Zelanda, Hughes (1985) obtiene producciones de 14 t ha⁻¹ de MS dentro de la rotación maíz-avena. En Kentucky, Murdock y Wells (1978) describen producciones de 16-17 t ha⁻¹ de MS para el maíz en monocultivo. En condiciones de regadío, Fuehring (1978) en Nuevo México obtiene producciones tan sólo ligeramente superiores a las 15 t ha⁻¹ de MS, valor muy inferior al conseguido en nuestras condiciones.

En la **Fig. 4** puede verse la evolución de la acumulación de biomasa aérea del maíz, para los tres primeros años experimentales y los cuatro tratamientos aplicados.

Como en todos los cultivos, la fase inicial del crecimiento del maíz es muy lenta en todos los tratamientos estudiados debido al bajo porcentaje de radiación solar interceptado. A continuación y a medida que aumenta el porcentaje de suelo cubierto, se incrementa la tasa de acumulación de biomasa, hasta alcanzar los valores máximos, para reducirse luego nuevamente en la última fase del ciclo del cultivo, al disminuir el IAF debido a la senescencia del cultivo y al ser menos favorables las temperaturas y los niveles de radiación solar. En los tratamientos de secano, la acumulación de biomasa se ve limitada por el déficit hídrico, que comienza a producirse, como promedio, a finales del mes de julio. No obstante se pueden observar ciertas diferencias interanuales en el patrón de déficit hídrico registrado. En el primer año el déficit es relativamente tardío, pero a pesar de cierta recuperación posterior del crecimiento, es bastante severo. En el segundo año el estrés es más gradual. Finalmente, en el tercer año la falta de agua se hace notar muy precozmente pero se produce una recuperación posterior.

También se puede observar que la acumulación de biomasa de los tratamientos LC se sitúa en general por encima de los SD, lo que se traduce, como ya hemos señalado, en una acumulación de biomasa significativamente superior para estos tratamientos en los años 99 y 00.

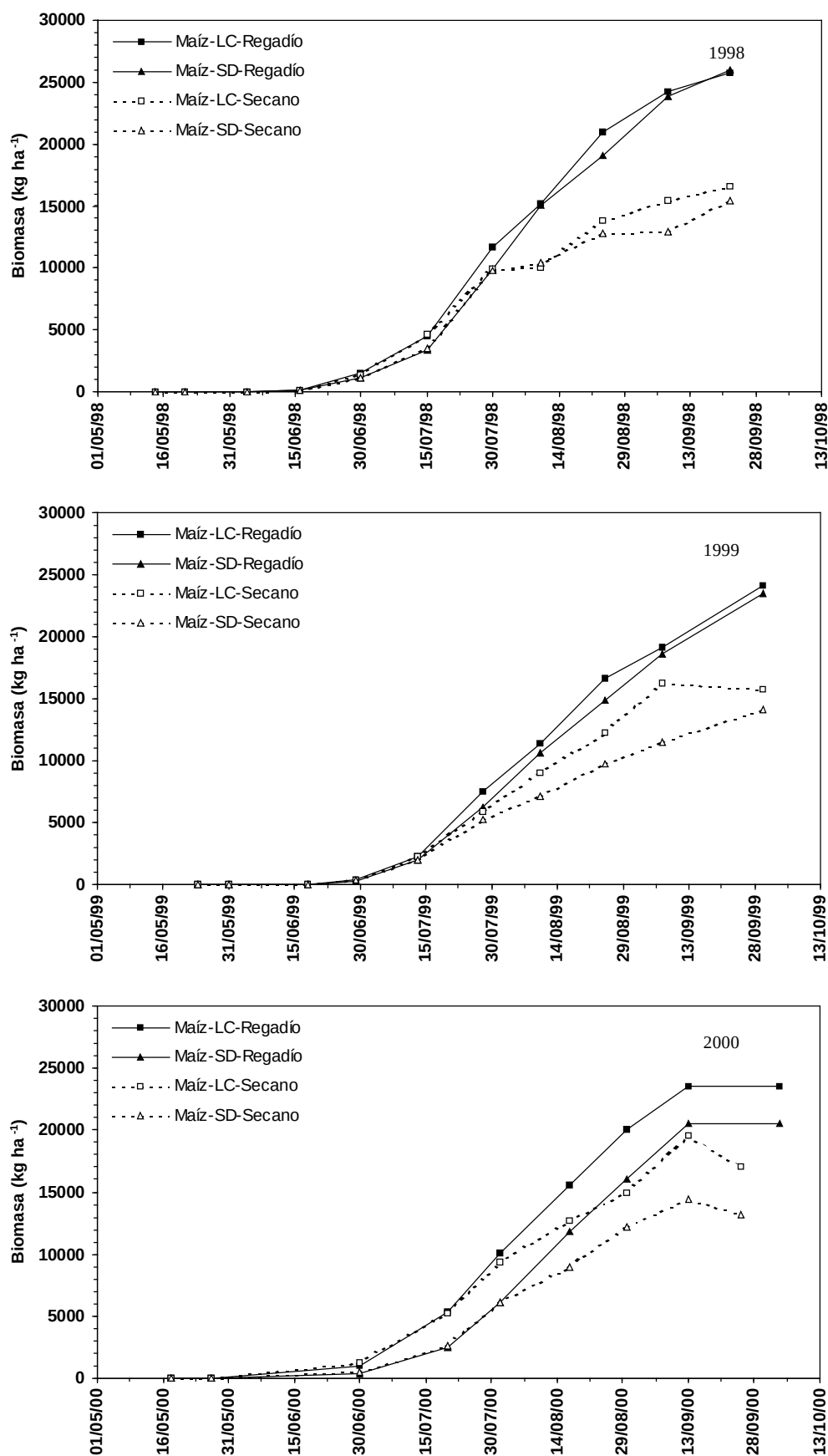


Fig. 4. Evolución de la biomasa aérea acumulada por el maíz en laboreo convencional (LC) y siembra directa (SD) en regadío y en secano durante los tres primeros años de ensayo (1998, 1999 y 2000). Los puntos son medias de cuatro repeticiones.

1.3.3.2. PRODUCCIÓN DE GRANO E ÍNDICE DE COSECHA

Además de alcanzar altas producciones de forraje, es conveniente que el maíz para silo tenga una elevada digestibilidad y un reducido contenido en fibra. Esto último se consigue con un alto índice de cosecha para grano (IC; Donald, 1962), ya que el grano es la parte de la planta que presenta los mayores niveles de digestibilidad (Roth y Undersander, 1995).

Se analiza en este apartado el rendimiento en grano, dada la importancia que tiene desde el punto de vista cuantitativo respecto de la biomasa total producida, y principalmente en el valor nutritivo del ensilado. Por el mismo motivo se estudia también el IC, si bien el destino habitual del maíz dentro de esta rotación es la cosecha de la planta entera para ensilar.

En la **Tabla 11** pueden verse las producciones de grano e IC obtenidos en el muestreo de cosecha de los diferentes años experimentales.

Las producciones de grano (MS) se sitúan en torno a las 12 t ha⁻¹ para los tratamientos regados (R) en los tres primeros años, 11 t ha⁻¹ el cuarto año y poco más de 10 t ha⁻¹ el quinto año. Las producciones de estos tratamientos han sido significativamente superiores a la de los secanos (S) en todos los años ensayados. Estas diferencias se situaron en torno a 4-5 t ha⁻¹ para los tres primeros y el quinto años y 1 t ha⁻¹ para el cuarto que fue el más húmedo de la serie.

Entre los dos sistemas de siembra ensayados, sólo hemos encontrado diferencias significativas durante el tercer año, en el que la media de los tratamientos LC superó a la de los SD en algo más de 1 t ha⁻¹.

La interacción Sistema de Siembra × Riego ha sido significativa el cuarto año, debido a las altas producciones de grano del tratamiento SD-R (0.32 t ha⁻¹ más que LC-R) y las bajas producciones del tratamiento SD-S (1.27 t ha⁻¹ menos que LC-S).

Los valores de IC se sitúan entre 0.44 y 0.56 (**Tabla 11**). Estos valores son superiores a los indicados por Richard y Crookston. (1979), que indica valores de IC entre 0.27 (en condiciones de estrés hídrico) y 0.49 (sin estrés hídrico) para densidades de 10 plantas m⁻² y ciclos de producción cortos.

Los valores más reducidos de IC se obtuvieron el primer año y los más altos el cuarto año. Hemos encontrado diferencias significativas entre los tratamientos R y S en los años segundo, tercero, cuarto y quinto, si bien con resultados dispares. Así, el IC de los tratamientos R ha sido significativamente superior a los S el tercer año y el quinto año, mientras que sucedió lo contrario en el segundo y cuarto. Estos resultados no coinciden por tanto con las fuertes reducciones de IC observadas por Richard y Crookston (1979) para condiciones de estrés hídrico, si bien es probable que nuestras condiciones de estrés sean menos severas.

Entre sistemas de siembra sólo hemos encontrado diferencias significativas el tercer año, en el que los IC de los tratamientos SD han superado a los de LC.

Tabla 11. Rendimientos en grano (materia seca; t ha⁻¹) e índices de cosecha (IC) obtenidos en el muestreo de cosecha del cultivo de maíz sometido a los distintos tratamientos en los años de ensayo

	Año 1998		Año 1999		Año 2000		Año 2001		Año 2002	
	Grano	IC	Grano	IC	Grano	IC	Grano	IC	Grano	IC
LC Regadío^a	12.09	0.471	12.36	0.514	12.48	0.530	10.80	0.518	8.89	0.479
LC Secano^a	7.22	0.435	8.30	0.530	8.10	0.474	10.47	0.551	5.45	0.442
SD Regadío^a	12.48	0.480	12.05	0.514	11.43	0.557	11.12	0.524	10.43	0.515
SD Secano^a	6.77	0.436	7.68	0.546	6.56	0.498	9.20	0.551	5.95	0.46
Valores medios										
LC^a	9.66	0.453	10.33	0.522	10.29	0.502	10.64	0.535	7.67	0.461
SD^a	9.62	0.458	9.86	0.530	9.00	0.528	10.16	0.537	8.19	0.487
Regadío	12.28	0.475	12.20	0.514	11.95	0.544	10.96	0.521	10.15	0.497
Secano	7.00	0.435	7.99	0.538	7.33	0.486	9.84	0.551	5.70	0.451
Análisis estadístico										
Sistema de siembra (S)	NS	NS	NS	NS	*	*	NS	NS	NS	NS
Riego (R)	***	NS	**	*	**	**	*	*	**	*
Interacción (S × R)	NS	NS	NS	NS	NS	NS	*	NS	NS	NS
CV^b (%)	8.72	5.36	4.66	1.83	9.57	2.94	4.38	2.77	8.38	6.52

^aLC: Laboreo convencional; SD: Siembra directa

^bCV: Coeficiente de variación

*, **, ***: Diferencias significativas al 5%, 1% y 1 %o respectivamente; NS: Diferencia no significativa.

1.3.4. PRODUCCIÓN DE BIOMASA TOTAL DE LAS ROTACIONES ESTUDIADAS

La producción de la rotación mas intensiva (raigrás italiano alternativo-maíz ;RIA-

M) aventajó ampliamente a la menos intensiva (raigrás italiano no alternativo ; RINA) en todos los casos (**Tabla 8**). Incluso RIA-M de secano (S) superó a RINA de regadío (R) en un 39%, como promedio de los cinco años estudiados.

Dentro de la rotación RIA-M, no se encontraron diferencias atribuibles al sistema de siembra en los años 97-98, 00-01 y 01-02. En el año 98-99, las producciones de los tratamientos de siembra directa (SD) superaron a los de laboreo convencional (LC), debido a las mayores producciones del RIA SD durante el invierno, ya que las producciones de los maíces en verano han sido algo superiores en las parcelas LC. Estas tendencias se invirtieron en el año 99-00, siendo las producciones de los tratamientos LC superiores a las de los SD. Esto fue debido a la menor producción del Maíz SD, ya que la producción del RIA SD durante el invierno fue superior. Por tanto, estos datos experimentales parecen mostrar, que en general y considerando la media de producción de años sucesivos, la técnica de siembra no afecta a la producción de RIA-M. Sin embargo otras investigaciones realizadas en Galicia y la Cornisa Cantábrica (Piñeiro y Pérez, 2000; Rodríguez *et al*, 1996), encuentran producciones algo superiores en LC que en SD, obteniendo los peores resultados en SD, como ya se ha indicó para los diferentes componentes de las rotaciones, en suelos más pesados que los de nuestro ensayo. Además, las menores producciones del maíz SD dentro de la rotación son las responsables de este hecho, ya que no encuentran diferencias significativas entre los tratamientos de RIA.

También dentro de la rotación RIA-M, los tratamientos R superaron a los S, debido a las mayores producciones del Maíz R, ya que las producciones del RIA precedidas de Maíz S fueron superiores en cuatro de los años ensayados a las precedidas de Maíz R. En este estudio queda claro que en Lugo el rendimiento en biomasa y en grano del maíz, y en consecuencia del RIA-M, puede verse muy beneficiado por la utilización del riego (en regadío se obtiene un 31% más de producción (media de los cinco años experimentales) que en secano).

La evolución de la producción anual de forraje de la rotación RIA-M R a lo largo de los años puede verse en la **Fig. 5**. Se observa una fuerte tendencia descendente en los primeros años, y una estabilización posterior en torno a las 25 t ha⁻¹ de MS. El descenso de la producción de la rotación es en parte debido a la reducción de la producción del

maíz, como ya se ha comentado anteriormente, y también a las bajas producciones del RIA durante el tercer y cuarto año. El repunte de las producciones en el quinto año se debe a la mayor producción del cultivo de invierno, ya que las producciones del maíz son las más bajas de los cinco años.

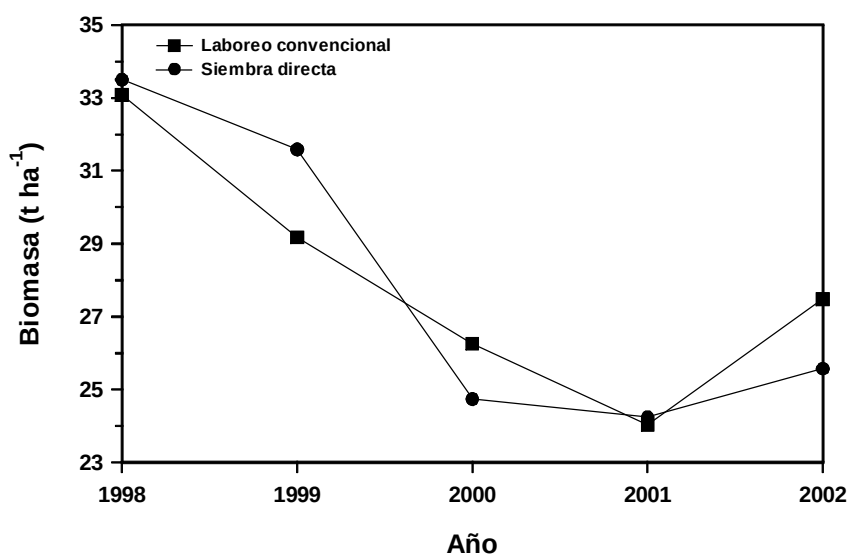


Fig. 5. Evolución de la producción anual de biomasa de forraje de la rotación raigrás italiano alternativo-Maíz (RIA-M) en regadío durante los 5 años de ensayo. Los puntos son medias de cuatro repeticiones.

Considerando solamente la rotación de dos cultivos por año, las producciones medias de los cinco años, se situaron en 28.00, 21.67, 27.93 y 20.90 t ha⁻¹ de MS (LC R, LC S, SD R y SD S, respectivamente), valores que en condiciones de secano, superan a los obtenidos en otros ensayos realizados en Galicia. Son producciones superiores a las obtenidas por Lloveras (1987) (15.5 t ha⁻¹ de MS para la rotación maíz-raigrás; 16.6 t ha⁻¹ de MS para el maíz-centeno; 18.6 t ha⁻¹ de MS para el maíz-avena+veza) y Piñeiro y Pérez (1997) (17.1 t ha⁻¹ de MS para el maíz-raigrás italiano).

Si comparamos nuestras producciones medias (también en secano) con las obtenidas en otros lugares, vemos que son superiores a las 13-18 t ha⁻¹ de MS obtenidas para el maíz-raigrás en el oeste de Francia (Raphalen, 1980), también a las 14-16 t ha⁻¹ de MS señaladas por Van Bockstaele *et al.* (1979) para el maíz-centeno en Bélgica o a las 15 t ha⁻¹ de MS del maíz-avena en Wisconsin (Okoli *et al.*, 1984). Son no obstante,

similares a las 20.6 t ha⁻¹ de MS obtenidas en Kentucky (Murdock y Wells, 1978) e inferiores a las 24 t ha⁻¹ de MS obtenidas en Nueva Zelanda con la rotación maíz-avena (Hughes, 1985), a las 22-23 t ha⁻¹ de MS de Iowa (Helsen y Wedin, 1981) o a las 25.9 t ha⁻¹ de MS del sistema maíz-centeno en Minnesota (Crookston *et al.*, 1978).

Las producciones medias obtenidas en condiciones de regadío son ligeramente superiores a las señaladas para el sistema maíz-cebada en Nuevo México por Fuehring (1978) en donde la producción media fue de 26.6 t ha⁻¹ de MS.

En las **Figs. 6 y 7** puede verse la evolución temporal de la acumulación de biomasa aérea durante los tres primeros años experimentales de las rotaciones RIA-M y RINA en R y S, respectivamente. En estas figuras, y especialmente en la **Fig. 7**, puede observarse la existencia de un amplio período, desde que se levanta la pradera de la rotación hasta que se implanta el cultivo de maíz y alcanza su fase lineal de crecimiento, en el que la tasa de crecimiento del RINA es muy superior. Sin embargo a continuación, los fuertes crecimientos del maíz durante el verano, más adaptado ecológicamente a las altas temperaturas y elevados niveles de radiación solar, hacen que la producción acumulada al final del año agrícola sea significativamente superior en RIA-M que en RINA.

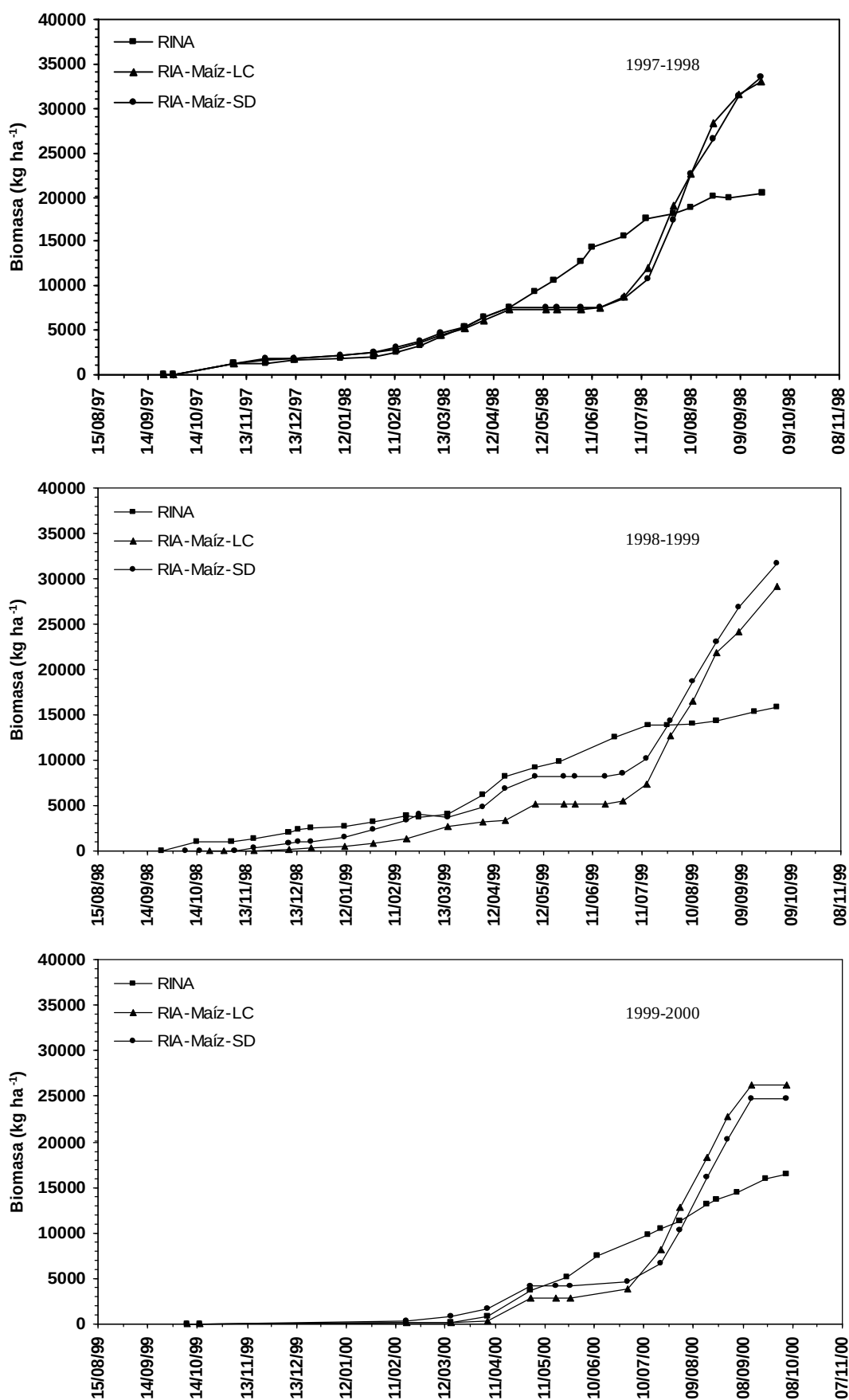


Fig. 6. Evolución de la biomasa aérea acumulada por las rotaciones raigrás italiano no alternativo (RINA) y raigrás italiano alternativo-maíz (RIA-Maíz) en laboreo convencional (LC) y siembra directa (SD) en regadío durante las campañas 97-98, 98-99 y 99-00. Los puntos son medias de cuatro repeticiones.

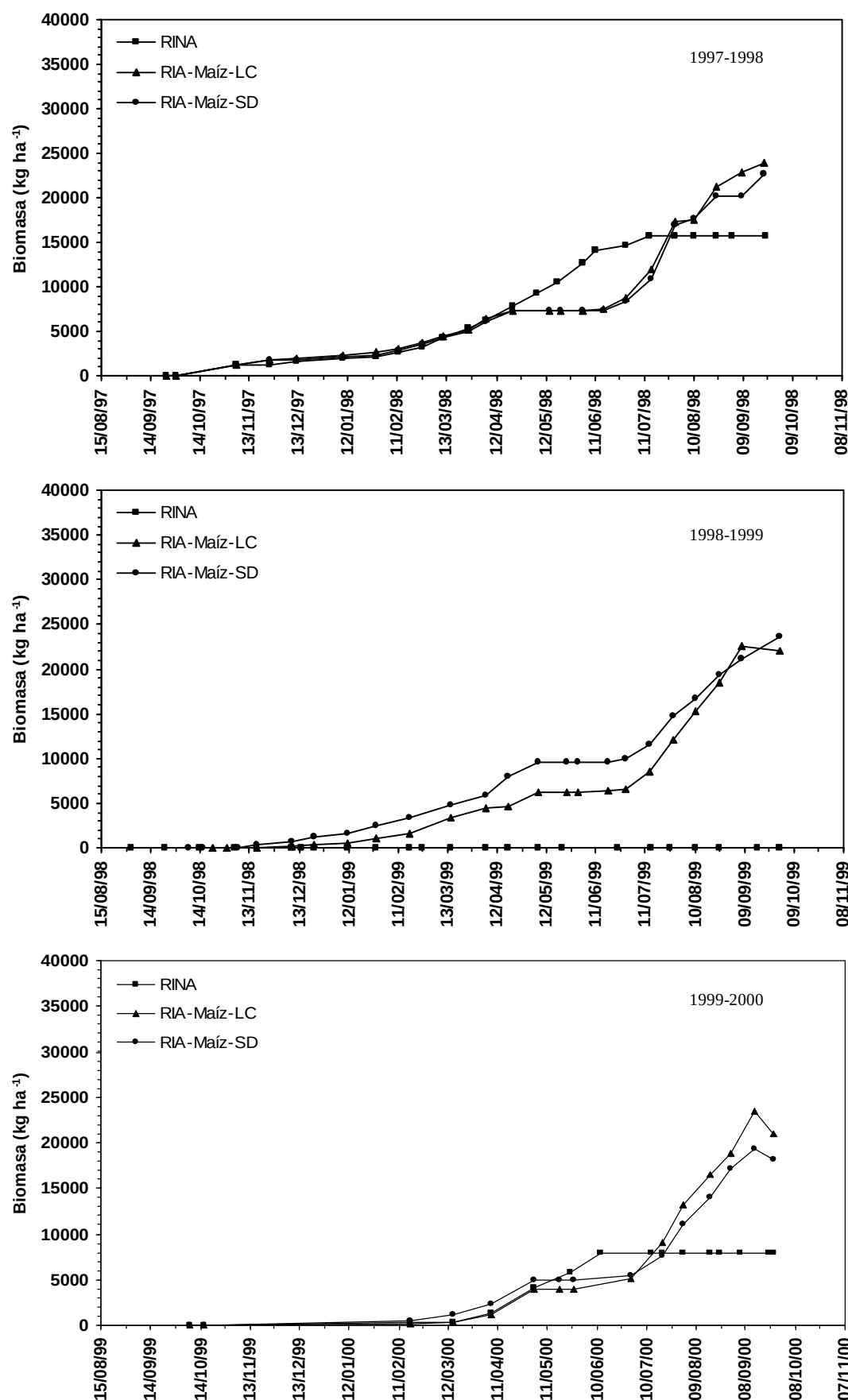


Fig. 7. Evolución de la biomasa aérea acumulada por las rotaciones raigrás italiano no alternativo (RINA) y raigrás italiano alternativo-maíz (RIA-Maíz) en laboreo convencional (LC) y siembra directa (SD) en seco durante las campañas 97-98, 98-99 y 99-00. Los puntos son medias de cuatro repeticiones.

1.4. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO PRIMERO

1. La rotación forrajera más intensiva ensayada, en la que se siembran en rotación anual raigrás italiano alternativo y maíz (RIA-M), obtiene producciones de biomasa muy superiores a la pradera bianual (raigrás italiano no alternativo; RINA). Incluso si comparamos RIA-M en secano (S) con RINA en regadío (R), las producciones de la rotación anual en S superaron en un 36% a RINA R. Estos resultados son atribuibles a la mejor adaptación del cultivo C4 a las condiciones de crecimiento durante el verano.
2. El riego permite obtener incrementos muy importantes en la producción. Estos incrementos se sitúan entre 30% y 102% en el caso del RINA (excluyendo el segundo año experimental en el que la producción del RINA S fue nula), y entre 13% y 43% para el RIA-M. Estos resultados ponen de manifiesto la importancia que puede tener el riego como factor de intensificación de la producción de forrajes en Galicia. Sería preciso sin embargo estudiar con detalle la viabilidad económica de las eventuales inversiones en las infraestructuras de riego necesarias.
3. Las producciones anuales de Maíz R superaron a las S entre 18% y 62% (49% de promedio de los 5 años). Las diferencias son superiores a las citadas para la rotación completa en el párrafo anterior. Esto se debe a la dilución del efecto del riego por las producciones de RIA que nunca se regó al no producirse déficit hídrico durante su ciclo de crecimiento. Además, las producciones de RIA precedidas de Maíz S fueron superiores en cuatro de los cinco años experimentales, lo cual se atribuye a las mayores extracciones de nutrientes del maíz R, que pudo conducir (aunque las dosis de abonado aplicadas fueron más que suficientes para cubrir las extracciones de N, P y K) a una menor disponibilidad de algún nutriente para el RIA.
4. En los primeros años experimentales, se observó en la evolución de la producción anual de forraje de la rotación RIA-M R una clara tendencia decreciente seguida de una estabilización en torno a 25 t ha⁻¹ de MS. El descenso de la producción de la rotación es en parte debido a la reducción de la producción del maíz, y también a las bajas producciones del RIA durante el tercer y cuarto año. El quinto año se produce un cierto repunte de las producciones debido a la mayor producción del cultivo de invierno, ya que las producciones del maíz son las más bajas de los cinco años ensayados.

5. Dentro de la rotación RIA-M, en la mayor parte de los años ensayados no hay diferencias atribuibles al sistema de siembra. Estos datos parecen mostrar, que en general y considerando la media de producción de años sucesivos, la técnica de siembra no afecta a la producción de RIA-M.

Capítulo 2

EVALUACIÓN DEL MODELO CERES-Maize EN GALICIA

2.1 INTRODUCCIÓN

2.1.1. ANÁLISIS DE SISTEMAS Y MODELOS DE SIMULACIÓN

Según Banks y Carson (1984), un sistema es un grupo de elementos que están unidos entre sí por algún tipo de interacción regular o interdependencia para la consecución de un objetivo. Por su parte, Leffelaar y Ferrari (1989) definen un sistema como una parte de la realidad con límites claros que contiene elementos interrelacionados. Los sistemas biológicos, en los que se incluyen los sistemas de cultivo objeto de estudio de la Agronomía, son sistemas jerárquicos caracterizados por sus múltiples niveles de organización (Thornley y Jonson, 1990).

El análisis de sistemas es el estudio del estado de un sistema en un momento dado y su respuesta temporal a las perturbaciones. El análisis de sistemas está más centrado en el estudio del comportamiento del sistema como unidad funcional que en el estudio estático de sus diferentes componentes (Campbell y Stockle, 1994). Al ser prácticamente inviable en la mayoría de los casos analizar sistemas mediante el estudio directo del sistema real, resulta necesario el desarrollo de un modelo del sistema en estudio que recoja sus principales atributos.

Un modelo es la representación simplificada de un objeto o de un sistema. Forrester (1972) clasifica los modelos en: (1) físicos y abstractos; (2) estáticos y dinámicos; (3) lineales y no lineales; (4) estables e inestables.

Los modelos físicos suelen ser réplicas físicas a escala reducida (maquetas) del sistema estudiado, mientras que los modelos abstractos están constituidos por símbolos que pueden ser un lenguaje o un pensamiento. Mientras un modelo estático representa una relación que no varía con el tiempo, un modelo dinámico trata las interrelaciones que varían con el tiempo en el interior del sistema estudiado. Al ser los procesos biológicos dinámicos por naturaleza, su representación suele requerir el uso de modelos dinámicos. Los modelos lineales o no lineales representan sistemas similares, pero se considera lineal todo modelo en el que los parámetros son independientes de las

variables de estado. Los modelos dinámicos pueden dividirse en estables e inestables según el sistema que representan. Mientras un sistema estable tiende a volver a su condición inicial después de haber sido alterado, un sistema inestable conoce un crecimiento u oscilación de amplitud variable en función de la magnitud de la alteración inicial.

Entre los modelos abstractos, los modelos matemáticos constituyen una categoría especial. Estos se pueden dividir en: (1) mecanicistas o empíricos; (2) estocásticos o deterministas; (3) de optimización o de simulación. Se diferencian por el método de análisis de sistemas (mecanicistas o empíricos), por el tipo e relación matemática empleada (estocásticos o deterministas), o en función de los objetivos perseguidos (simulación y optimización).

Charles-Edwards y Thornley (1974) definen los modelos mecanicistas como aquellos empleados para comprender el funcionamiento de un sistema en términos de los mecanismos que actúan sobre él. Pueden ser contruidos dividiéndolo y tratando de comprender su comportamiento de acuerdo con la evolución de sus componentes y de sus interacciones. Estos modelos suelen contener un número elevado de parámetros y tienen la desventaja de ser generalmente muy complejos. Para estos mismos autores, los modelos empíricos son aquellos contruidos a partir de observaciones de un sistema real, obteniendo una ecuación o un grupo de ecuaciones que representan los datos experimentales. El procedimiento puede parecer de entrada arbitrario. No obstante, en muchas ocasiones se trata de la única solución disponible para resolver un problema. Estos modelos son más fáciles de construir que los modelos mecanicistas pero tienen la desventaja de no representar los principales procesos subyacentes que tienen lugar en el interior del sistema, y de utilizar parámetros frecuentemente sin significado biológico. Además, estos modelos presentan una gran dependencia respecto de las condiciones del medio en el que han sido desarrolladas sus ecuaciones empíricas.

Por otro lado, Milthorpe y Moorby (1979) indican que los modelos estocásticos describen los eventos de un modo estadístico, mientras que los modelos deterministas están esencialmente más definidos, aunque muchas de las relaciones empleadas sean originalmente empíricas o estadísticas.

Finalmente, existen modelos de simulación que permiten generar estados eventuales del sistema (imágenes) a partir de diferentes hipótesis o escenarios.

2.1.2. LAS ETAPAS DE CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO

Se suele considerar que la modelización matemática de sistemas consta de tres etapas características: la conceptualización, la formulación y la evaluación.

La conceptualización sería la comprensión mental del fenómeno que se pretende modelizar. Puede resumirse en un diagrama o esquema. La formulación es la conexión entre el modelo mental o esquema creado en la conceptualización y el modelo matemático formulado en un programa de ordenador. Finalmente, durante la evaluación se verifica que los resultados obtenidos por el modelo son coherentes con el sistema real que se pretende representar.

En la evaluación del modelo podemos distinguir entre la calibración, que se realiza habitualmente buscando el valor de los parámetros que minimizan las discrepancias entre el modelo y una serie de datos experimentales, y la validación, en la que se determina la bondad del modelo calibrado, contrastando los resultados del modelo con datos experimentales diferentes (independientes) a los empleados en la fase de calibración.

2.1.3. MODELOS MATEMÁTICOS DE SIMULACIÓN DEL CRECIMIENTO DE LOS CULTIVOS

Según Campbell y Stockle (1994), un modelo de simulación del crecimiento de un cultivo es cualquier algoritmo que trata de describir de modo cuantitativo la respuesta del sistema de cultivo a su entorno. Éstos se han desarrollado con diferentes fines entre los que se pueden mencionar: (1) orientar la investigación facilitando el contraste de hipótesis de teorías cuantitativas, o (2) tratar de ampliar el rango de aplicación de

resultados obtenidos en condiciones muy específicas. Además, si los modelos de simulación son fáciles de manejar, pueden constituir una poderosa herramienta de transferencia de tecnología.

Los factores que intervienen en el crecimiento de un cultivo son muy variados y de una gran complejidad, interactuando además simultáneamente en muchas ocasiones. Estas interacciones no suelen ser lineales e incluso presentan en ocasiones un comportamiento caótico (Jones y Luyten, 1998). De este modo, el cultivo se ve afectado por factores meteorológicos y del suelo, así como por las distintas plagas, enfermedades o malas hierbas, de tal manera que los modelos son sólo aproximaciones muy simplificadas del sistema que pretendemos representar.

Penning de Vries *et al.* (1989) proponen una clasificación de los modelos de simulación de la producción de los cultivos en función de los factores limitantes. Las categorías de esta clasificación se definen como sigue:

<u>Tipo de modelo</u>	<u>Factores limitantes</u>
Nivel 1	Temperatura y radiación solar
Nivel 2	Déficit hídrico + los anteriores
Nivel 3	Nitrógeno + los anteriores
Nivel 4	Fósforo + los anteriores

Los niveles 5 y sucesivos incluyen los efectos de otros factores como la competencia de malas hierbas, enfermedades, etc.

La mayoría de los modelos de simulación de cultivos generalistas que existen en la actualidad incluyen las variables meteorológicas y los balances hídricos y de nitrógeno, alcanzando por tanto el nivel 3 de la clasificación anterior (Stockle y Nelson, 1994; Hoogenboom *et al.*, 1994).

Como ya se señaló, los modelos son siempre una simplificación de la realidad, pero pueden ser más o menos mecanicistas, y en consecuencia complejos, al tratar de definir con mayor o menor precisión las relaciones que se establecen entre los diferentes elementos del sistema (Penning de Vries *et al.*, 1989). En la actualidad, incluso los modelos de cultivos más mecanicistas, como CROPGRO (Jones *et al.*, 2003) tienen

secciones más mecanicistas y otras más empíricas en función del grado de conocimiento del proceso que se pretende simular.

Los comienzos de la simulación matemática del crecimiento de los cultivos datan de la década de los sesenta del pasado siglo (de Wit *et al.*, 1965; Duncan *et al.*, 1967; Keulen, 1975). Los primeros esfuerzos se centraron en los balances de carbono, agua y energía de los sistemas de producción de cultivo. Sin embargo, estos esfuerzos se vieron limitados por la baja disponibilidad y capacidad de cálculo de los equipos informáticos, por el desconocimiento o falta de comprensión de los procesos fisiológicos involucrados en el crecimiento y por la falta de estandarización de los formatos de los archivos de datos de entrada y salida en los modelos (Boote *et al.*, 1997).

Los primeros modelos se enfocaron hacia la simulación del crecimiento de los cultivos en condiciones no limitantes del medio (agua y nutrientes *ad libitum*, así como ausencia de plagas, enfermedades y malas hierbas; modelos de nivel 1 según la terminología antes descrita) con lo que se consiguió simular la producción potencial de numerosas especies, si bien estos rendimientos no tenían demasiado que ver con los obtenidos en condiciones reales de cultivo. En las últimas tres décadas se ha producido un importante avance, tanto desde el punto de vista de la mejora y disponibilidad de los equipos informáticos, como de la comprensión de los procesos fisiológicos de los cultivos y de las bases de datos disponibles. Esto ha permitido simular cada vez con más detalle el crecimiento de los cultivos y su respuesta a condiciones subóptimas del entorno (Ruiz Nogueira, 1999).

Los modelos de simulación disponibles en la actualidad abarcan prácticamente todos los cultivos herbáceos con cierto interés económico. Gran número de ellos han revelado ser de gran utilidad en programas de investigación. De cara al futuro es de prever que los modelos jueguen un papel cada vez más importante en la agricultura comercial (especialmente en la denominada agricultura de precisión) en aspectos como la planificación y optimización de rendimientos, no sólo desde el punto de vista productivo o económico, sino también de la sostenibilidad de las producciones y del mantenimiento de los equilibrios ambientales (Jacobson *et al.*, 1995).

2.1.4. EL MODELO MATEMÁTICO DE SIMULACIÓN DEL CRECIMIENTO DEL MAÍZ: CERES-Maize

Son varios los modelos matemáticos de simulación del maíz que se han desarrollado con el objetivo de predecir correctamente el rendimiento en biomasa y en grano en años climáticos sucesivos y en entornos muy distintos. Entre estos modelos se incluyen el “Splinter Model” (Splinter, 1974), “SIMAIZ” (Duncan, 1975), el “Bio-photo-thermal Model” (Coligado y Brown, 1975), el “Energy-Crop Growth Model” (Coelho y Dale, 1980), el “CORNF” (Stapper y Arkin, 1980), el “CERES-Maize” (Jones y Kiniry, 1986), o el “ALMANAC” (Kiniry *et al.*, 1997; Kiniry y Bockholt, 1998).

Uno de los de más amplia utilización es el modelo CERES-Maize (“Crop Environmental Resource Syntesis”). CERES-Maize es un modelo dinámico, con algunas partes mecanicistas y otras empíricas, que simula el desarrollo, el crecimiento y el rendimiento del maíz (Jones y Kiniry, 1986). Durante la duración del ciclo, el modelo calcula cada día, el avance de la fenología, la tasa de crecimiento y el reparto de la biomasa entre los órganos en fase de crecimiento. Cuando el agua y el nitrógeno no limitan el crecimiento, los procesos simulados se ven afectados por la principales variables ambientales (radiación solar, temperatura máxima y mínima diaria), factores específicos del cultivar (cv.) empleado (cinco coeficientes genéticos definidos en la **Tabla 12** que definen las características del cv.), y las prácticas de cultivo (v.g. fecha de siembra, densidad de plantas, y distancia entre líneas). Este modelo de cultivo, como todos los incluidos en el software del DSSAT (“Decision Support System for Agrotechnology Transfer”; <http://www.icasa.net/dssat/index.html>; Jones *et al.*, 2003), permite también simular el desarrollo y crecimiento del cultivo en entornos donde el agua y el nitrógeno son limitantes, cuando las opciones de balance de agua y nitrógeno están activadas. En estas circunstancias, el modelo realiza a diario un balance hídrico y de nitrógeno del cual deriva unos factores de déficit hídrico y de nitrógeno que permiten modular el crecimiento respecto del potencial.

Tabla 12. Coeficientes genéticos de CERES-Maize para el cultivar Clarica

P1	175.0	Grados día con base 8 °C (°Cd) desde emergencia hasta el final de la fase juvenil
P2	0.0	Sensibilidad al fotoperíodo (días de retraso en la iniciación de la flor masculina por hora de incremento del fotoperíodo. 0 para cultivares no sensibles al fotoperíodo)
P5	630.0	Grados día con base 8 °C desde 75% de emisión de sedas hasta madurez fisiológica (°Cd)
G2	936.0	Número potencial de granos por planta
G3	8.0	Tasa potencial de crecimiento de los granos (mg grano ⁻¹ d ⁻¹)

Desde su primera versión (Jones y Kiniry, 1986), los múltiples procesos de calibración, validación y adaptación de CERES-Maize realizados por diferentes grupos de investigación han conducido a que existan en la actualidad, un gran número de versiones no siempre bien descritas en la literatura científica, que difieren todas ligeramente del modelo original. Se trata de un fenómeno generalizado en los modelos de crecimiento de los cultivos pero es especialmente frecuente en el caso de modelos relativamente simples y de amplio uso como CERES-Maize (Carberry *et al.*, 1989; Lahrouni *et al.*, 1993; Castrignano *et al.*, 1998; du Toit *et al.*, 2002; Ben Nouna *et al.*, 2003), probablemente porque resultan más fáciles de comprender y de modificar.

Por otro lado, los investigadores que desarrollaron la primera versión de CERES-Maize y sus sucesores (C.A. Jones, J.R. Kiniry, J.T. Ritchie, W.D. Batchelor, ...) han ido aportando modificaciones tratando de mejorar progresivamente el modelo y así conseguir que sus estimaciones fueran fiables en un rango creciente de sistemas de cultivo y de entornos (Kiniry *et al.*, 1997; Kiniry y Bockholt, 1998; IBSNAT, 1989; Jones *et al.*, 2003). Estas versiones “oficiales” de CERES-Maize son las que figuran en las sucesivas versiones del DSSAT.

Debido a que este trabajo está centrado en tres versiones recientes de CERES-Maize que están bien documentadas en la literatura científica, éstas son las que se comentarán de modo más exhaustivo en esta introducción: (1) CERES-Maize-2003 (llamada de aquí en adelante CERES-2003), la versión más reciente propuesta por Kiniry y colaboradores; (2) la versión incluida en el DSSAT V3.5 (software oficial) o CERES-3.5; y (3) la versión incluida en el DSSAT V4.0 o CERES-4.0 (software oficial; Jones *et al.*, 2003). Estas versiones no han sido ampliamente probadas en regiones relativamente frías para el cultivo del maíz como las comarcas interiores de

Galicia donde el régimen de temperaturas hace obligatorio el uso de cv. de ciclo corto. En estas zonas el maíz se cultiva esencialmente para aprovechamiento para silo y por tanto se cosecha antes de madurez fisiológica.

2.1.5. PRINCIPIOS BÁSICOS DE LAS SIMULACIONES CON CERES-Maize

CERES-Maize utiliza la ecuación más sencilla que permite estimar la biomasa total (B_T) producida por un cultivo:

$$B_T = g * d$$

donde g es la tasa de crecimiento medio y d es la duración del crecimiento (Ritchie *et al.*, 1998).

Estima a continuación la fracción de la biomasa total formada por el grano o índice de cosecha que puede oscilar entre 0.0 para cultivos sometidos a un estrés severo durante períodos críticos (cuajado del grano, llenado del grano) hasta más de 0.5 para cultivos realizados bajo condiciones cercanas al óptimo. Por tanto, el reparto de B_T hacia el grano debe tener en cuenta tanto el crecimiento como el desarrollo.

La acumulación de biomasa está relacionada con la cantidad de radiación fotosintéticamente activa (PAR) incidente y la cantidad de hojas disponible para absorber esta radiación. Además, solamente una porción del carbono fijado por la fotosíntesis tiene la posibilidad de ser cosechado ya que parte de este carbono se pierde por respiración. La otra dimensión del crecimiento, la que se refiere a la expansión en superficie o en volumen de los órganos no está controlada directamente por el balance neto de carbono fijado. Los factores ambientales afectan de modo diferente al crecimiento de las células y al crecimiento en peso. Esto explica por qué plantas en crecimiento vegetativo, creciendo a diferentes temperaturas pero sometidas a los mismos niveles de radiación, acabarán con el tiempo teniendo diferentes tamaños y diferentes pesos.

Por su parte, la cronología del crecimiento de las plantas tiene dos aspectos diferentes: el desarrollo fásico y el morfológico. El desarrollo fásico se refiere a

cambios en los estadios de desarrollo y está casi siempre asociado con grandes cambios en las pautas de reparto de asimilados entre los principales órganos de la planta. La evolución física es uno de los principales procesos de la planta y existe una gran variabilidad entre cultivares. Esta diversidad permite seleccionar cultivares cuyo ciclo se adapte al período donde tanto el régimen de temperaturas como la disponibilidad hídrica es menos limitante para la especie. Este aspecto de la modelización es de gran importancia cuando se trata de analizar los riesgos asociados con la producción de un cultivo. El desarrollo morfológico se refiere al inicio y fin del desarrollo de diferentes o sucesivos órganos a lo largo del ciclo del cultivo. La modelización de los aspectos morfológicos de un cultivo se centra en la estimación del número de hojas, hijos (tallos secundarios), frutos o semillas que produce una planta dentro de un cultivo.

El principal factor ambiental que suele afectar a ambos tipos de desarrollo, físico y morfológico, es la temperatura de la parte de la planta en crecimiento. No obstante, las funciones de respuesta a la temperatura de los dos procesos de desarrollo pueden ser diferentes. Por otro lado, las características del cultivar que afectan al efecto del fotoperíodo sobre la evolución fenológica condicionan la longitud de las diferentes partes del ciclo.

Una razón lógica de separar claramente las ecuaciones que describen los procesos de crecimiento y desarrollo es determinar cómo diferentes niveles de disponibilidad de agua y nutrientes afectan a cada uno de estos procesos. Se sabe, por ejemplo, que el déficit hídrico afecta mucho más a los procesos de expansión foliar que a la evolución fenológica o a la fijación de carbono por la fotosíntesis. Por tanto, en entornos donde la disponibilidad de agua es incierta, los diferentes aspectos del crecimiento y desarrollo deben ser tratados por separado, sobre todo cuando la falta de agua puede darse en cualquier momento del ciclo.

2.1.6. DESARROLLO DEL CULTIVO

En CERES-Maize, el submodelo de desarrollo fásico cuantifica la edad fisiológica del cultivo y describe la duración de 8 fases (Ritchie *et al.*, 1998):

- Siembra – germinación.
- Germinación – emergencia.
- Emergencia – fin de período juvenil.
- Fin de período juvenil – iniciación floral.
- Iniciación floral – floración femenina y fin del crecimiento de las hojas.
- Fin de crecimiento foliar – principio de llenado de grano.
- Principio de llenado de grano – madurez fisiológica.
- Madurez fisiológica – cosecha.

La evolución fenológica del cultivo depende de la temperatura, del fotoperíodo y de la sensibilidad al fotoperíodo del cv.

El modelo asume que la tasa de desarrollo se incrementa linealmente por encima de la temperatura base hasta los 34 °C, y decrece hasta cero cuando la temperatura se incrementa desde 34 a 44 °C. De modo similar, se considera que las tasas de iniciación de hojas y aparición de hojas cambian linealmente en estos dos rangos de temperaturas. Al ser el maíz una especie de día corto, la inducción fotoperiódica decrece con el incremento del fotoperíodo para fotoperíodos mayores de 12.5 horas (Kiniry, 1991).

2.1.6.1. RESPUESTA TÉRMICA DE LA TASA DE DESARROLLO

Como se vio, la escala de tiempo de los cultivos y de los cereales en particular está muy relacionada con la temperatura de los órganos en crecimiento. El término considerado como más apropiado para describir la duración del desarrollo es el denominado “tiempo térmico” (TT) definido como sumatorio diario acumulado del “tiempo térmico diario” (DTT). DTT es calculado como sigue:

$$DTT_{TBASE} = TEMPM - TBASE, \quad TEMPM > TBASE \quad [1]$$

Donde TEMPM es la temperatura media diaria y TBASE es la temperatura base del proceso. Se considera que TBASE es de 8 °C durante todo el ciclo, excepto en el período de germinación a emergencia en el que es de 10 °C.

Por otro lado, DTT es igual a cero si la temperatura máxima diaria (TMAX) es menor que TBASE. El método de cómputo de DTT cambia si TMAX es mayor que TBASE y la temperatura mínima diaria (TMIN) es menor que TBASE, o si TMAX supera los 34 °C. La unidad de DTT y TT es el grado centígrado día (°Cd).

Siembra-emergencia

Asumiendo una adecuada humedad en el suelo, el período de siembra a emergencia requiere un día para la germinación y 45 TT para la elongación del coleoptilo.

Emergencia-floración femenina

Durante este período que el número total de hojas del cultivo (TLNO) queda fijado. TLNO es el resultado de añadir a los seis primordios foliares preexistentes en la semilla los que se forman entre la emergencia y la iniciación floral. La fecha de iniciación floral se calcula usando un valor de TT determinado (coeficiente genético P1; **Tabla 12**) modulado por el efecto del fotoperíodo (ver detalles más adelante). El modelo asume que se precisan 21 °Cd para que se inicie un nuevo primordio de hoja entre emergencia e iniciación floral (plastocrono) y 38.9 °Cd para que una nueva hoja empiece a despuntar (filocrono). Una vez calculado el TT requerido entre emergencia e iniciación floral, basta con dividirlo por el plastocrono para predecir el número de primordios foliares que se inician en este período. Entonces se puede calcular la fecha de floración femenina, que en el modelo coincide con el final del crecimiento foliar. Ésta se determina a partir de TLNO y del filocrono.

La predicción del momento de iniciación floral es por tanto de suma importancia. El método empleado para predecir este momento asume que mientras la planta no alcanza el final del período juvenil ($TT < P1$), su desarrollo es independiente del fotoperíodo. Cuando TT supera P1, el desarrollo se hace independiente de la

temperatura y la planta se encuentra en la fase sensible al fotoperíodo. CERES-Maize considera que todos los cultivares llegan a iniciación floral cuatro días después del final del período juvenil para fotoperíodos menores o iguales a 12.5 h. Para fotoperíodos mayores a 12.5 h, se calcula la tasa de inducción fotoperiódica (RATEIN) como sigue:

$$\text{RATEIN} = 1/[4 + P2 * (\text{HRLT} - 12.5)] \quad [2]$$

HRLT es el número de horas de luz y P2 es un coeficiente genético específico para la sensibilidad al fotoperíodo del cultivar (**Tabla 12**). Las plantas alcanzan el estadio de iniciación floral cuando la suma diaria acumulada de RATEIN es mayor o igual que 1,0. Como ya se mencionó, en el modelo la floración femenina y el final del crecimiento de las hojas ocurren el mismo día. Para determinar el TT requerido desde emergencia hasta floración femenina, se tienen en cuenta dos factores: (1) la segunda hoja aparece 20 °Cd después de la emergencia de la planta; (2) se precisan 76 °Cd desde la aparición de la última hoja hasta la aparición de la lígula de esta hoja (fin de expansión foliar). Por tanto, el TT buscado responde a la ecuación:

$$\text{TT} = (\text{TLNO} - 2) * 38.9 + 96.0 \quad [3]$$

Floración femenina - madurez fisiológica

Siguiendo la descripción de Johnson y Tanner (1972), el modelo divide este período en tres fases. Estas fases incluyen un período no efectivo de llenado del grano, un período de llenado efectivo del grano y un período desde el final del llenado efectivo del grano hasta madurez fisiológica.

CERES-Maize asume un número °Cd desde floración femenina hasta madurez fisiológica específico para cada cultivar (coeficiente genético P5; **Tabla 12**). El período de llenado no efectivo precisa de 170 °Cd mientras que el de llenado efectivo finaliza cuando se ha acumulado el 95% de los °Cd requeridos desde floración a madurez fisiológica (P5).

2.1.7. ACUMULACIÓN DE BIOMASA

Del mismo modo que la mayor parte de los modelos de cultivos más sencillos, CERES-Maize utiliza el concepto de Eficiencia en el Uso de la Radiación (EUR) para estimar la acumulación potencial de biomasa por planta (PCARB) reduciendo así al mínimo, el número de ecuaciones necesarias para calcular la fotosíntesis neta.

$$PCARB = EUR * IPAR / PLTPOP \quad [4]$$

$$IPAR = PAR * [1 - \exp(-EXT * IAF)] \quad [5]$$

donde IPAR es la radiación fotosintéticamente activa (PAR) interceptada por la cubierta, PLTPOP es la densidad de planta por unidad de superficie, IAF es el índice de área foliar y EXT es el coeficiente de extinción de la PAR dentro de la cubierta.

Además, en todas las versiones estudiadas de CERES-Maize la producción real de biomasa por planta (CARBO) puede ser inferior a PCARB debido a temperaturas subóptimas o a déficit de agua o nitrógeno.

$$CARBO = PCARB * \min(PRFT, SWFAC, NFAC, 1.0) \quad [6]$$

donde PRFT (ver 2.2.3.1), SWFAC y NFAC son factores reductores de estrés de temperatura, agua y nitrógeno, respectivamente. Estos factores pueden variar entre 0 (máximo estrés) y 1 (mínimo estrés).

Después de calcular CARBO, el modelo reparte los asimilados entre raíces y hojas desde emergencia hasta iniciación floral y entre raíces, tallos y hojas desde iniciación floral hasta emisión de sedas (floración femenina). El crecimiento de la espiga (GROEAR) empieza a calcularse en cuanto el cultivo sobrepasa el estadio de floración femenina. Entonces se detiene la acumulación de biomasa en hojas, pero tanto los tallos como las raíces pueden seguir ganando peso, si existe suficiente disponibilidad de asimilados para cubrir la demanda del sumidero prioritario de la espiga.

Más adelante el modelo estima el número de semillas por planta (GPP), a partir de la media diaria de incremento de peso por planta entre floración femenina y principio de llenado efectivo de grano. En cuanto se inicia el período de llenado efectivo de grano, CERES-Maize calcula diariamente la tasa de llenado por grano mediante un procedimiento “fuente-sumidero-reserva” que permite estimar la tasa total de crecimiento de grano por planta (GROGRN; Ritchie *et al.*, 1998). Si la disponibilidad

de asimilados es suficiente, el crecimiento reproductivo se calcula multiplicando el coeficiente genético G3 (tasa potencial de crecimiento de grano a temperatura óptima) por RGFILL (tasa relativa de llenado de grano; ver 2.2.3.2) que puede variar entre 0 y 1, en función de la temperatura.

Los tres modelos analizados (CERES-2003, CERES-3.5 y CERES-4.0) difieren en algunos aspectos del cómputo de la acumulación de biomasa y del reparto de asimilados. A continuación se describen las principales diferencias existentes entre estas tres versiones:

2.1.7.1. FACTOR REDUCTOR DE LA FOTOSÍNTESIS (PRFT)

PRFT es una función de temperatura que afecta EUR y que se computa cada día. Adopta valores comprendidos entre 0 y 1 y está representada en la **Fig. 8** que muestra PRFT *versus* temperatura media durante las horas de luz diurna ($TAVGD = 0.25 * TMIN + 0.75 * TMAX$). Cuando el agua y el nitrógeno no son factores limitantes, PRFT=1 a temperatura óptima y EUR alcanza su máximo valor, mientras que si PRFT = 0, EUR es nulo y en consecuencia la biomasa del cultivo no se incrementa. En CERES-2003 y CERES-3.5, las ecuaciones de cálculo de PRFT coinciden con las del modelo original (Jones y Kiniry, 1986):

$$PRFT = 1.0 - 0.0025 * ((0.25 * TMIN + 0.75 * TMAX) - 26.0)**2 \quad [7]$$

si PRFT < 0, PRFT = 0.0

La función está ponderada hacia TMAX con el objetivo de tener en cuenta las temperaturas medias durante las horas de luz en las que se produce la fotosíntesis.

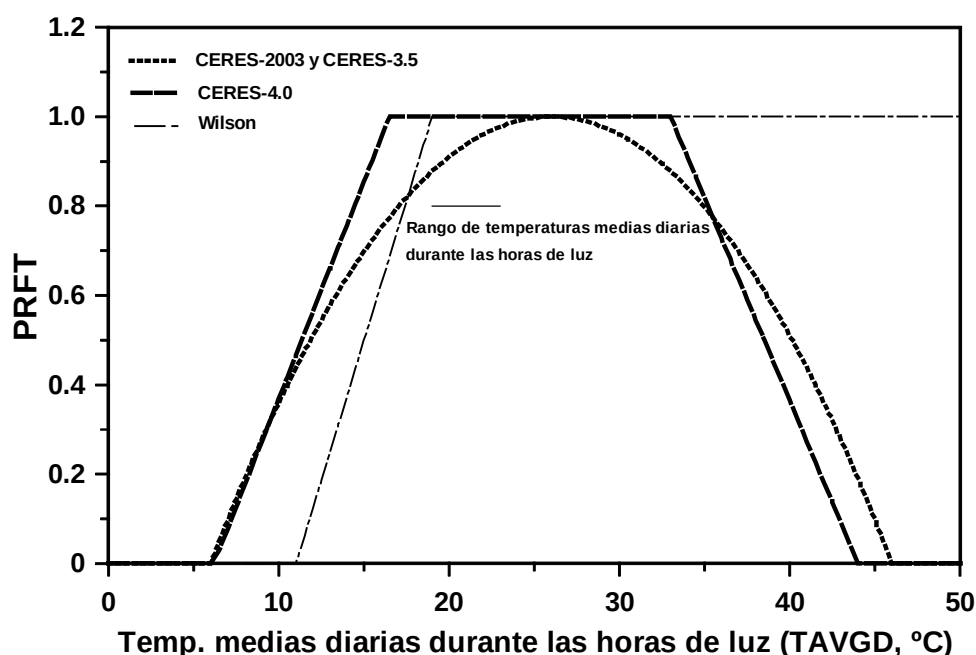


Fig. 8. Funciones de temperatura que afectan al factor reductor de la fotosíntesis (PRFT) en CERES-2003, CERES-3.5, CERES-4.0, y función propuesta por Wilson *et al.* (1995) cuando la amplitud térmica entre el día y la noche es de 12 °C. Se muestra el rango de temperaturas medias diarias durante las horas de luz (TAVGD) registrado durante las estaciones de crecimiento de los 8 tratamientos estudiados ($TAVGD = 0.25 * TMIN + 0.75 * TMAX$).

En CERES-4.0, PRFT sigue una función de temperatura diferente: se trata de una función lineal de TAVGD con cuatro temperaturas cardinales que se indican a continuación (una temperatura base (T_b) de 6.2 °C, un primer óptimo (T_{opt1}) de 16.5 °C, un segundo óptimo (T_{opt2}) de 33 °C y un máximo (T_{max}) de 44.0 °C (ver **Fig. 8**). En el nuevo enfoque modular adoptado por el DSSAT-4.0, CERES-4.0 utiliza funciones externas, constituidas por sus cuatro temperaturas cardinales (incluidas en el archivo MZCER040.SPE) para definir la forma de PRFT y RGFILL (ver más adelante).

Otros modelos simples de maíz basados en el uso de EUR, como el propuesto por Muchow *et al.* (1990), también han necesitado la incorporación de un factor reductor de EUR (**Fig. 8**) cuando las temperaturas caen por debajo de 19 °C para simular

correctamente el crecimiento del maíz en zonas frías de Nueva Zelanda (Wilson *et al.*, 1995).

2.1.7.2. TASA RELATIVA DE LLENADO DE GRANO (RGFILL)

RGFILL es una función de temperatura que adopta valores comprendidos entre 0 y 1 y se calcula diariamente. Esta función afecta al crecimiento diario del grano (la **Fig. 9** muestra RGFILL *versus* temperatura media diaria ($TEMPM = (TMIN + TMAX) * 0.5$), considerando una amplitud térmica entre la temperatura mínima y máxima diaria de 12 °C similar a la que se dio en los ensayos de campo). Cuando el agua y el nitrógeno no son limitantes y a temperatura óptima, RGFILL = 1 y el crecimiento del grano es igual al coeficiente genético G3 (**Tabla 12**), mientras que si RGFILL = 0, el crecimiento del grano es nulo.

En CERES-2003 y CERES-3.5, RGFILL se calcula como en la versión original del modelo (Jones y Kiniry, 1986):

- (1) se calculan ocho factores de temperatura a lo largo del día (TMFAC(I)), uno cada tres horas ($I = 1$ a 8), con la finalidad de estimar una temperatura media cada tres horas (TTMP),

$$TMFAC(I) = 0.931 + 0.114 * I - 0.0703 * I^{**2} + 0.0053 * I^{**3} \quad [8]$$

$$TTMP(I) = TMIN + TMFAC(I) * (TMAX - TMIN) \quad [9]$$

- (2) el valor de RGFILL se obtiene sumando la ecuación [10], desde $I = 1$ hasta 8, si $TTMP(I) > 6$,

$$RGFILL = RGFILL + (1.0 - 0.0025 * (TTMP(I) - 26.0)^{**2}) / 8.0 \quad [10]$$

En CERES-4.0, RGFILL sigue una función lineal de la temperatura media diaria (TEMPM, ver **Fig. 9**) con las siguientes temperaturas cardinales: una temperatura base (Tb) de 5.5 °C, un primer óptimo (Topt1) de 16.0 °C, un segundo óptimo (Topt2) de 39.0 °C y un máximo (Tmax) de 48.5 °C.

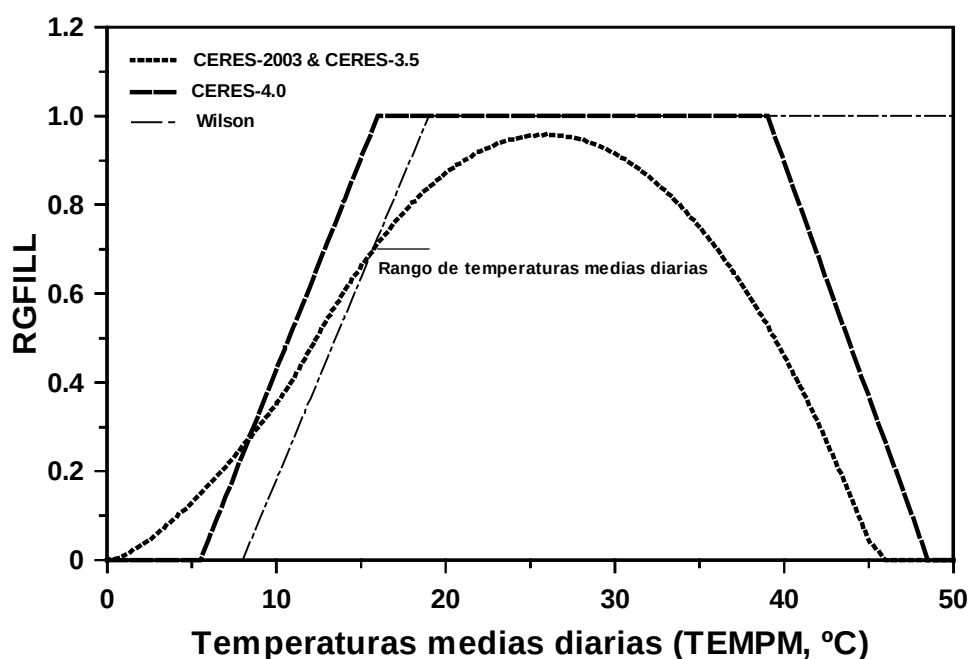


Fig. 9. Función de temperatura que afecta a la tasa relativa de llenado de grano (RGFILL) en CERES-2003, CERES-3.5, CERES-4.0, y función de temperatura propuesta por Wilson *et al.* (1995) cuando la amplitud térmica entre el día y la noche es de 12 °C. Se muestra el rango de temperatura media registrado durante el período de llenado de grano de los 8 tratamientos estudiados ($TEMPM = (TMIN + TMAX) * 0.5$).

Por otro lado, el modelo simple de Muchow *et al.* (1990), también ha necesitado la incorporación de un factor reductor del índice de cosecha (**Fig. 9**) cuando las temperaturas caen por debajo de 19 °C para simular correctamente el crecimiento del maíz en zonas frías de Nueva Zelanda (Wilson *et al.* ; 1995).

2.1.7.3. EFICIENCIA EN EL USO DE LA RADIACIÓN (EUR)

En CERES-2003, EUR disminuye con el déficit de presión de vapor (VPD) y se calcula mediante las ecuaciones propuestas por Stockle y Kiniry (1990):

$$\text{si } VPD < 1 \text{ kPa, } EUR = 4.33 \text{ g MJ(PAR)}^{-1} \quad [11]$$

$$\text{si } VPD \geq 1 \text{ kPa, } EUR = 5.05 - 0.72 * VPD \text{ g MJ(PAR)}^{-1} \quad [12]$$

Además, el modo de estimar VPD en CERES-2003 es distinto al empleado en CERES-3.5 o CERES-4.0, que emplean ecuaciones propuestas por Diaz y Campbell (1988) y Stockle y Kiniry (1990) que no requieren el dato de la temperatura del punto de rocío.

$$VPD = (PMEAN - PMIN) / (1.0 - 0.3 * (PMEAN - PMIN)) \quad [13]$$

$$PMEAN = \exp(52.58 - 6790.5 / (TEMPM + 273.)) - 5.03 * ALOG(TEMPM + 273.)) \quad [14]$$

$$PMIN = \exp(52.58 - 6790.5 / (TMIN + 273.)) - 5.03 * ALOG(TMIN + 273.)) \quad [15]$$

donde PMEAN y PMIN son la presión de vapor a saturación (kPa) a temperatura media (TEMPM) y mínima (TMIN) diaria respectivamente.

En CERES-3.5 y CERES-4.0, EUR es constante e igual a $4.2 \text{ g MJ(PAR)}^{-1}$, mientras que en la versión original del modelo (Jones y Kiniry, 1986), EUR es constante e igual a $5.0 \text{ g MJ(PAR)}^{-1}$.

2.1.7.4. COEFICIENTE DE EXTINCIÓN (EXT) PARA LA RADIACIÓN FOTOSINTÉTICAMENTE ACTIVA (PAR)

En CERES-2003, como en la versión original (Jones y Kiniry, 1986), el coeficiente de extinción para la PAR es igual a 0.65.

En CERES-3.5 y CERES-4.0, EXT es una función (ver ecuación [16]) de la distancia entre líneas y de la densidad de plantas (EXT = 0.59 cuando la distancia entre líneas (ROWSPC) es de 0.75 m y la densidad de plantas es de $100000 \text{ pl. ha}^{-1}$).

$$EXT = 1.5 - 0.768 * ((ROWSPC * 0.01)**2 * PLTPOP)**0.1 \quad [16]$$

2.1.7.5. EFICIENCIA EN LA CONVERSIÓN DE LA MATERIA SECA VEGETATIVA REMOVILIZADA AL GRANO

El modelo empieza a removilizar materia seca hacia el grano cuando la producción diaria de biomasa por planta teniendo en cuenta los factores limitantes (CARBO) es más pequeña que la tasa de crecimiento del grano (GROGRN). En estas circunstancias, una

cantidad limitada de materia seca vegetativa puede ser translocada desde los tallos y las hojas hacia el grano.

En CERES-2003, de acuerdo con Kiniry *et al.* (1992), 1.0 g de pérdida de peso en tallo permite incrementar en 0.36 g el peso de los granos.

Por su parte, en CERES-3.5 y CERES-4.0, como en la versión original (Jones y Kiniry, 1986), la pérdida de 1.0 g de tallos permite un incremento de 1.0 g en la biomasa de los granos.

2.1.7.6. NÚMERO DE GRANOS POR PLANTA Y TASA DE CRECIMIENTO DEL GRANO

Como en otros cereales, el rendimiento en grano del maíz está directamente relacionado con el número de granos m^{-2} en cosecha. Por tanto, resulta crucial tener una estimación precisa del número de granos por planta (GPP) para que el modelo consiga predecir correctamente la producción (Ritchie y Alargarswamy, 2003)

En CERES, GPP es una función de PSKER (tasa media diaria de fotosíntesis durante el estadio 4 (desde anthesis hasta el período de llenado efectivo del grano)). PSKER está directamente relacionado con los valores de CARBO durante el estadio 4 y por lo tanto se ve afectado linealmente por los valores diariamente computados de SWFAC que tienen un efecto directo sobre CARBO. De este modo, a medida que SWFAC disminuye desde 1.00 hasta 0.00, se incrementa el déficit hídrico mientras CARBO y GPP disminuyen.

En CERES-2003, se considera que para los cultivares de ciclo corto

$$GPP = 127 * PSKER + 10 \quad [17]$$

siguiendo lo propuesto por Kiniry *et al.* (2002) apoyándose en resultados experimentales obtenidos por Tollenaar *et al.* (1992).

En consecuencia, en este caso GPP se calcula sin el coeficiente genético G2 (número potencial de granos por planta (**Tabla 12**)) y es una función lineal de la

acumulación de biomasa durante el estadio 4, que resulta ser un período relativamente corto de unos 10-20 días de duración.

En CERES-3.5 y CERES-4.0,

$$GPP = G2 * PSKER / 7200.0 + 50.0 \quad [18]$$

Además, el modo de cálculo de PSKER es ligeramente diferente en CERES-2003 que en CERES-4.0 o CERES-3.5.

En CERES-3.5 y en CERES-4.0, así como en la versión original del modelo (Jones y Kiniry, 1986), la tasa de crecimiento del grano por día (GROGRN) depende de la temperatura (RGFILL (tasa relativa de llenado de grano); como se ha visto, se trata de una función de la temperatura), del número de semillas por planta, del crecimiento potencial de las semillas ($G3$, $\text{mg semilla}^{-1} \text{ d}^{-1}$) y del factor de déficit hídrico (SWFAC):

$$GROGRN = RGFILL * GPP * G3 * 0.001 * (0.45 + 0.55 * SWFAC) \quad [19]$$

En CERES 2003, el cálculo se realiza de idéntico modo pero sin incluir el factor de estrés hídrico.

2.1.7.7. CÁLCULO DEL ÍNDICE DE AREA FOLIAR

En las tres versiones recientes de CERES-Maize consideradas, el cálculo del área foliar por planta es básicamente el mismo que el utilizado por la versión original (Jones y Kiniry, 1986). Los coeficientes que emplea CERES-2003 son idénticos a los descritos por Jones y Kiniry (1986), mientras que CERES-4.0 y CERES-3.5 utilizan un conjunto de coeficientes ligeramente diferente que conduce a estimaciones un poco más altas de IAF.

2.1.8. BALANCE DE AGUA EN EL SUELO Y CÁLCULO DE LOS FACTORES DE ESTRÉS HÍDRICO DEL CULTIVO

Aunque existan pequeñas diferencias entre las versiones de CERES-Maize estudiadas en los algoritmos que calculan el balance hídrico del cultivo y los factores de

déficit hídrico, sólo se indicarán incidentalmente, centrándonos en describir la versión más reciente (CERES-4.0), por ser la que dio mejores resultados en condiciones no limitantes del medio y disponer de un mayor número de opciones de cómputo de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o).

2.1.8.1. BALANCE DE AGUA DEL SUELO, CRECIMIENTO DE LAS RAÍCES, Y EXTRACCIÓN DE AGUA EN CERES-4.0

En CERES-4.0, como en todo los modelos incluidos en DSSAT-4.0, el balance diario del agua del suelo utiliza el balance unidimensional de Ritchie (1985), llamado modelo de “tipping bucket” o de cubo desbordante, que predice el flujo y la extracción de agua para cada uno de los horizontes del perfil del suelo (el modelo contempla un máximo de diez horizontes).

Para que el modelo pueda realizar el balance hídrico diario, es preciso que las siguientes características físicas de cada uno de los horizontes (L) del suelo estén definidas en el archivo SOIL.SOL: el límite superior de drenaje o capacidad de campo (DUL(L), $\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O cm}^{-3} \text{suelo}$), el límite inferior o punto de marchitez permanente (LL(L), $\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O cm}^{-3} \text{suelo}$), el contenido de agua a saturación (SAT(L), $\text{cm}^3 \text{H}_2\text{O cm}^{-3} \text{suelo}$), y una función de preferencia de distribución de las raíces en el suelo (SRGF(L); factor de distribución relativa de la longitud de raíces (0.00-1.00) en el horizonte L que cuantifica la hospitalidad potencial de un horizonte determinado).

La densidad de raíces calculada en el horizonte L (RLV(L), $\text{cm raíz cm}^{-3} \text{suelo}$) depende de la cantidad de materia seca asignada a las raíces por el modelo de cultivo. Ésta varía en función del suministro de asimilados (CARBO), la fase fenológica, y SRGF(L).

La profundidad de enraizamiento (RTDEP (cm)) es una función del tiempo térmico acumulado desde la germinación, considerando una temperatura base de 8 °C (CUMDTT):

- Antes de la germinación, $\text{RTDEP} = \text{SDEPTH}$
donde SDEPTH es la profundidad de siembra (cm)
- tras la germinación,

$$\text{si } \text{CUMDTT} \leq 275.0, \text{RTDEP} = \text{RTDEP} + \text{DTT} * 0.1 * \text{SQRT}(\text{SRGF}(\text{L}) * \text{MIN}(\text{SWFAC} * 2.0, \text{SWDF})) \quad [20]$$

$$\text{si } \text{CUMDTT} > 275.0, \text{RTDEP} = \text{RTDEP} + \text{DTT} * 0.2 * \text{SQRT}(\text{SRGF}(\text{L}) * \text{MIN}(\text{SWFAC} * 2.0, \text{SWDF})) \quad [21]$$

donde DTT es el tiempo térmico del día (°Cd) y SWDF es el déficit hídrico del horizonte de suelo L, donde se produce el frente de avance radicular. SWDF varía linealmente entre 1.00, cuando el horizonte correspondiente está en capacidad de campo (DUL(L)), y 0.00 cuando alcanza su punto de marchitez permanente (LL(L)). SWFAC es el factor de estrés hídrico sobre la fotosíntesis. Su modo de cálculo se indica más abajo.

La extracción potencial de agua por las raíces en un horizonte de suelo determinado para un día dado (RWU(L), cm d⁻¹) es una función del contenido de agua y de la densidad de raíces en este horizonte. Finalmente, la extracción potencial de agua por el conjunto del sistema radical del cultivo (RWU) se calcula como la suma de la extracción potencial de agua de todos los horizontes del perfil del suelo. Cuando RWU no es suficiente como para cubrir la transpiración potencial del cultivo (EP0) que demanda la atmósfera, entonces la transpiración real del cultivo (EP) es igual a RWU, y el factor de estrés hídrico sobre la fotosíntesis se calcula como SWFAC = EP/EP0, donde 0.00 corresponde al estrés hídrico máximo (no se produce transpiración ni fotosíntesis) y 1.00 a la ausencia de estrés. Como se vio, un SWFAC inferior a 1 reduce en proporción directa la producción neta de biomasa del día (CARBO). Además, cuando RWU es más pequeño que 1.5*EP0, el factor de turgor (TURFAC = EP/1.5 * EP0; factor comprendido entre 0.00 y 1.00) adopta valores inferiores a 1.00 y empieza a limitar la tasa de expansión foliar. El factor 1.5 de la ecuación de TURFAC permite que el proceso de expansión foliar responda antes al déficit hídrico que los procesos de acumulación de biomasa, vinculados a los flujos de CO₂ a través de los estomas.

2.1.8.2. OPCIONES DE CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN EN CERES-4.0

En la actualidad CERES-4.0 permite el uso de diferentes ecuaciones para calcular la evapotranspiración potencial del cultivo (E_0 , mm d^{-1}), que en este trabajo se considera como equivalente a la “evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándares” o (ET_c) tal como lo definen Allen *et al.* (1998)): (1) Priestley-Taylor (tal como lo formuló Ritchie (1972, 1985); llamado PT de aquí en adelante), y (2) Penman-Montieth-FAO56 (Allen *et al.* (1998); llamado P-FAO56 de aquí en adelante). PT (1) es la opción que emplea por defecto el modelo y la más empleada, debido en gran medida a que requiere menos datos climáticos (datos diarios de radiación solar y temperatura mínima y máxima). P-FAO56 (2) requiere además, datos diarios de la temperatura del punto de rocío y de la velocidad del viento. En la actualidad, el cálculo de este último método se realiza empleando un coeficiente de cultivo (K_c) de 1.00, constante a lo largo de todo el ciclo, no permitiendo en consecuencia que E_0 supere la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0). Las ecuaciones utilizadas por estas dos opciones para el cálculo de E_0 han sido descritas por Sau *et al.* (2004). En CROPGRO-4.0, modelo de simulación de leguminosas incluido en DSSAT-4.0, existe otra opción que permite que K_c varíe con el IAF; sería conveniente que esta opción, más próxima a las recomendaciones de la FAO (Allen *et al.*, 1998) se incluyera en las futuras actualizaciones de CERES-Maize.

2.1.8.3. REPARTO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL (E_0) ENTRE EVAPORACIÓN POTENCIAL (ES_0) Y TRANSPIRACIÓN POTENCIAL (EP_0) EN CERES-4.0

El modelo divide E_0 entre evaporación potencial de agua del suelo (ES_0) y transpiración potencial del cultivo (EP_0), utilizando el método propuesto por Ritchie (1972, 1985). Éste considera que, cuando el suelo está húmedo, la porción de radiación solar (SR) que alcanza el suelo es gastada en forma de energía latente para evaporar agua desde la superficie. La fracción de SR que llega al suelo es una función del índice

de área foliar (IAF) (Eq. [22]). Ulteriormente, la evaporación del agua del suelo (ES) y el agua perdida por transpiración por el cultivo en un día concreto (EP) dependen de que haya suficiente agua disponible para cubrir la tasa potencial de evapotranspiración.

En DSSAT V4.0, la evaporación potencial de agua del suelo (ES0) se calcula como sigue:

$$ES0 = E0 * \text{EXP}(-KEP * IAF) \quad [22]$$

donde KEP es el coeficiente de extinción de la cubierta del cultivo para la radiación solar global cuyo valor en la actualidad está establecido en 0.685 en el DSSAT-4.0. En CERES-3.5 y CERES-2003 (versiones utilizadas por López-Cedrón *et al.* (2005) para simulaciones realizadas bajo condiciones no limitantes del medio), KEP adopta un valor próximo a 0.45 (aunque utilizando un método de cálculo más complejo, ver Jones y Kiniry, (1986)).

Los modelos de cultivo incluidos en el DSSAT-4.0 siguen la premisa (Ritchie, 1985) de que la evaporación del agua del suelo (ES) se produce en dos fases: (1) la fase constante o limitada por la energía (fase 1) y (2) la fase de tasa decreciente (fase 2). Durante la fase 2, ES es más pequeño que ES0.

Se calcula la parte de E0 asignada a la transpiración potencial del cultivo (EP0) con las Eq. [23] y [24], donde se emplea el mismo coeficiente de extinción (KEP=0.685) ya utilizado en el cálculo de ES0.

$$EP0 = E0 * (1.0 - \exp(-KEP * IAF)) \quad [23]$$

$$\text{si } EP0 + ES > E0 \text{ entonces } EP0 = E0 - ES \quad [24]$$

Cabe destacar que en CERES-4 se emplea el mismo KEP=0.685 para calcular ES0 y EP0 (ver Eq. [22] y [23]). En CERES-3.5 y anteriores, el coeficiente de extinción empleado era diferente para ambos procesos, siendo aproximadamente de 0.45 para ES0 pero igual a 1.00 para EP0.

Finalmente, el modelo calcula la transpiración del cultivo (EP), el factor de déficit hídrico que afecta a la fotosíntesis (SWFAC) y el factor de turgor (TURFAC).

2.1.9. OBJETIVOS DEL CAPÍTULO SEGUNDO

En este trabajo se pretende evaluar tres versiones recientes de CERES-Maize que están bien documentadas en la literatura científica, en condiciones de cultivo no limitantes del medio en Galicia: (1) CERES-Maize-2003, la versión más reciente propuesta por Kiniry y colaboradores; (2) la versión incluida en el DSSAT V3.5 (software oficial) o CERES-3.5; y (3) la versión incluida en el DSSAT V4.0 o CERES-4.0 (software oficial; Jones *et al.*, 2003). Estas versiones no han sido ampliamente probadas en regiones relativamente frías para el cultivo del maíz donde el régimen de temperaturas hace obligatorio el uso de cvs. de ciclo corto como en las comarcas interiores de Galicia. Se analizarán las causas de las diferentes predicciones de las versiones del modelo y se propondrán modificaciones que mejoren los resultados.

Después de su evaluación, se analizará la capacidad de la versión que de las mejores estimaciones bajo condiciones no limitantes del medio, para predecir el efecto del déficit hídrico sobre la producción de biomasa y grano. Con esta finalidad, se reevaluarán las funciones relacionadas con el cálculo de la evapotranspiración, el reparto de energía entre la transpiración del cultivo (EP; mm día⁻¹) y la evaporación del suelo (ES; mm día⁻¹), número de granos por planta, tasa de crecimiento del grano y los aspectos del programa que puedan ser responsables de las posibles pobres estimaciones del modelo en sistemas de secano. Finalmente, se propondrán modificaciones del modelo con el objetivo de mejorar sus predicciones en condiciones de secano.

2.2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.2.1. ENSAYOS DE CAMPO

En esta parte del trabajo se emplean los datos de maíz incluidos dentro de la rotación raigrás italiano alternativo-maíz bajo laboreo convencional (RIA-M LC), obtenidos en los ensayos descritos en 1.2. Además, se consideró oportuno para proceder a la evaluación de las diferentes versiones de CERES-Maize, completar la base de datos antes mencionada, con la obtenida con una serie de ensayos complementarios. En todos los ensayos, se empleó el cv. Clarica y la preparación del suelo fue idéntica a la empleada en los tratamientos de laboreo convencional del ensayo principal.

Estos ensayos complementarios consistieron en una segunda fecha de siembra realizada en los años 1998, 1999 y 2000: en 1998 sólo en condiciones de regadío (condiciones no limitantes del medio); en 1999 y 2000, bajo condiciones de regadío y de secano. El diseño experimental empleado en los ensayos complementarios fue de bloques al azar con cuatro repeticiones.

Como los demás ensayos, los ensayos complementarios se llevaron a cabo en la Finca de Prácticas de la EPS. Se empleó una parcela contigua a la del ensayo principal, con un suelo de características similares. En las **Tablas 13 y 14** aparecen las principales características de todos los tratamientos de regadío y de secano, respectivamente, empleados en esta parte del trabajo.

Tabla 13. Fecha de siembra, fecha de cosecha y densidad de plantas de los diferentes tratamientos de regadío empleados en las simulaciones

Tratamiento	Fecha de siembra (día juliano entre paréntesis)	Fecha de cosecha (día juliano entre paréntesis)	Densidad de plantas (pl. m ⁻²)
1998-1^a	14 de mayo (134)	22 de sep. (265)	9.8
1998-2^a	4 de junio (155)	14 de oct. (287)	10.0
1999-1^a	24 de mayo (144)	30 de sep. (273)	9.9
1999-2^a	7 de junio (158)	14 de oct. (287)	10.0
2000-1^a	18 de mayo (139)	4 de oct. (278)	9.7
2000-2^a	8 de junio (160)	19 de oct. (293)	9.7
2001	19 de mayo (139)	26 de sep. (269)	9.7
2002	8 de mayo (128)	1 de oct. (274)	9.8

Tabla 14. Fecha de siembra, fecha de cosecha y densidad de plantas de los diferentes tratamientos de secano empleados en las simulaciones

Tratamiento	Fecha de siembra (día juliano entre paréntesis)	Fecha de cosecha (día juliano entre paréntesis)	Densidad de plantas (pl. m ⁻²)
1998	14 de mayo (134)	22 de sep. (265)	10.3
1999-1^a	24 de mayo (144)	30 de sep. (273)	9.4
1999-2^a	7 de junio (158)	14 de oct. (287)	11.4
2000-1^a	18 de mayo (139)	25 de sep. (269)	9.5
2000-2^a	8 de junio (160)	19 de oct. (293)	10.0
2001	19 de mayo (139)	26 de sep. (269)	9.5
2002	8 de mayo (128)	1 de oct. (274)	8.0

Menos en las fechas de siembra, el manejo de los ensayos de campo complementario fue exactamente idéntico al del ensayo principal del año correspondiente, coincidiendo por tanto la dosis y profundidad de siembra, las cantidades de fertilizante aportadas y los tratamientos fitosanitarios con los descritos en 1.2.5. En regadío, el sistema de riego y la monitorización del riego también fue igual al descrito para las primeras fechas. El agua de riego aplicada a las primeras fechas de siembra ya se ha indicado (**Tabla 7**), mientras que la de las segundas fechas fue: 1998-2^a (265 mm); 1999-2^a (195 mm); 2000-2^a (230 mm).

El seguimiento de la evolución temporal de la producción de biomasa y la distribución de la materia seca entre los diferentes órganos se hizo del modo descrito en 1.2.6.

2.2.2. TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN DURANTE LA ESTACIÓN DE CRECIMIENTO

Complementamos aquí los datos climáticos descritos en 1.2.2, por ser de interés para la posterior discusión de esta parte del trabajo.

En la **Tabla 15** se muestran las temperaturas medias decenales de las máximas ($T_{máx}$) y mínimas diarias ($T_{mín}$). Mientras $T_{máx}$ generalmente estuvo por debajo 20 °C en mayo y junio y alcanzó el rango de los 25-27 °C sólo en los meses más cálidos, $T_{mín}$ se situó normalmente entre 8 y 10 °C en mayo, principios de junio y octubre, y osciló en los meses más calurosos entre 10 y 13 °C.

Tabla 15. Temperaturas medias máximas diarias ($T_{máx}$) y mínimas ($T_{mín}$) en períodos de 10-11 días entre mayo y octubre en 1998, 1999, 2000, 2001 y 2002

Año	1998		1999		2000		2001		2002	
	$T_{máx}$ (°C)	$T_{mín}$ (°C)	$T_{máx}$ (°C)	$T_{mín}$ (°C)	$T_{máx}$ (°C)	$T_{mín}$ (°C)	$T_{máx}$ (°C)	$T_{mín}$ (°C)	$T_{máx}$ (°C)	$T_{mín}$ (°C)
May. 1-10	17.2	6.8	17.8	8.7	19.2	8.4	13.2	3.9	13.8	5.1
May. 11-20	23.2	9.7	15.7	9.3	19.9	8.8	17.9	7.4	18.7	6.4
May. 21-31	17.4	8.0	22.4	8.1	18.6	8.8	26.6	10.7	16.0	6.4
Jun. 1-10	21.7	9.8	17.6	8.9	23.4	9.7	22.1	11.7	18.5	9.1
Jun. 11-20	23.5	8.8	22.0	11.6	26.7	9.3	21.6	9.6	26.0	11.1
Jun. 21-30	22.4	12.0	22.3	11.3	23.1	11.7	27.7	10.9	20.5	11.5
Jul. 1-10	20.6	12.5	26.2	12.8	22.1	12.3	23.3	12.5	21.0	10.3
Jul. 11-20	26.7	12.4	25.8	14.1	22.9	12.5	20.8	10.4	24.3	10.8
Jul. 21-31	23.8	13.2	26.1	14.6	24.2	13.5	24.6	13.2	24.9	13.6
Ago. 1-10	29.6	12.9	23.5	13.5	25.5	12.2	24.7	13.0	21.3	10.2
Ago. 11-20	25.1	15.8	24.3	11.8	27.7	14.1	24.4	11.2	26.5	12.6
Ago. 21-31	27.5	13.8	26.5	13.4	22.9	10.8	28.0	14.8	23.1	12.8
Sep. 1-10	23.5	13.0	27.1	15.0	25.5	10.9	22.3	11.4	22.0	11.4
Sep. 11-20	23.9	12.3	18.7	9.5	26.6	12.1	22.3	8.7	25.4	11.4
Sep. 21-30	19.1	11.6	19.0	11.5	20.0	9.2	20.1	9.1	22.6	9.5
Oct. 1-10	15.0	8.1	18.4	6.7	18.8	7.9	19.3	10.8	21.3	10.6
Oct. 11-20	18.6	9.3	16.6	9.5	14.9	6.9	19.4	9.8	16.7	7.0
Oct. 21-31	18.1	7.6	15.9	8.5	16.8	6.9	19.5	8.3	18.4	11.0

Las precipitaciones decenales acumuladas durante el período de crecimiento del cultivo (mayo-octubre) están recogidas en la **Tabla 16**. Las precipitaciones acumuladas registradas durante este período oscilaron entre 272 mm en el año más seco (1998) y 495 mm los años más húmedos (1999 y 2001).

Tabla 16. Precipitaciones acumuladas en períodos de 10-11 días entre mayo y octubre en 1998, 1999, 2000, 2001 y 2002

Año	1998	1999	2000	2001	2002
-----mm-----					
May. 1-10	22.0	33.0	86.8	46.7	20.8
May. 11-20	10.8	45.2	11.2	40.6	34.4
May. 21-31	40.0	3.4	7.0	0.0	30.7
Jun. 1-10	12.4	17.4	3.8	14.2	45.1
Jun. 11-20	0.6	0.0	0.2	3.6	0.0
Jun. 21-30	6.0	0.8	1.4	0.0	7.0
Jul. 1-10	28.6	4.4	22.4	32.5	6.5
Jul. 11-20	3.2	0.8	0.2	29.0	6.8
Jul. 21-31	0.4	0.8	29.8	0.0	0.2
Ago. 1-10	0.2	57.0	4.6	12.0	9.3
Ago. 11-20	16.4	1.6	8.8	13.0	1.6
Ago. 21-31	0.2	6.6	12.8	51.0	3.9
Sep. 1-10	21.2	23.0	0.2	0.0	25.2
Sep. 11-20	3.0	117.0	14.4	1.0	33.7
Sep. 21-30	85.2	17.2	41.8	79.0	0.3
Oct. 1-10	12.4	3.3	9.4	53.4	36.1
Oct. 11-20	2.8	72.6	94.4	66.6	113.1
Oct. 21-31	7.4	91.2	37.0	50.6	61.7

2.2.3. SEGUIMIENTO DE PARÁMETROS ECOFISIOLÓGICOS

2.2.3.1. FENOLOGÍA

La evolución de la fenología del maíz se realizó *de visu*, dos veces por semana, utilizando la clave de estadios de desarrollo propuesta por Ritchie y Hanway (1982) que se transcribe en la **Tabla 17**.

Tabla 17. Estadios de desarrollo del maíz (IBSNAT, 1988, basado en Ritchie y Hanway, 1982)

Estadios	Descripción
Vegetativos	
VE	50% de plantas emergidas
V1	50% de plantas con “collar” de la 1ª hoja visible
V2	50% de plantas con “collar” de la 2ª hoja visible
V3	50% de plantas con “collar” de la 3ª hoja visible
V4	50% de plantas con “collar” de la 4ª hoja visible
V5	50% de plantas con “collar” de la 5ª hoja visible
V6	50% de plantas con “collar” de la 6ª hoja visible
V(n)	50% de plantas con “collar” de la hoja n visible
VT	50% de plantas con la flor masculina completamente expandido pero las sedas aún no visibles
Reproductivos	
R1	50% de plantas con alguna seda visible
R2	50% de plantas en estadio de “ampollitas” (endosperma abundante, claro y fluido)
R3	50% de plantas en estadio “lechoso” (granos amarillos por fuera y lechoso-fluidos por dentro)
R4	50% de plantas en estadio “pastoso” (endosperma con consistencia pastosa)
R5	50% de plantas en estadio “dentado” (se comienza a formar el diente en la parte superior del grano)
R6	50% de plantas en madurez fisiológica (puntos o rayas negras visibles en la base de los granos)
R7	50% de plantas en madurez de cosecha

Para el seguimiento de la evolución fenológica del grano se realizaron muestreos cada tres días, procediendo a la determinación del porcentaje de materia seca en el grano. Se emplearon los siguientes criterios:

- Estadio de “ampollitas”: 16% de materia seca
- Estadio “lechoso”: 40% de materia seca
- Estadio “pastoso” (madurez de ensilado): 55% de materia seca
- Madurez fisiológica: 60% de materia seca

En el ensayo principal, al estar el maíz incluido dentro de una rotación forrajera, se cosechó en madurez de ensilado y no alcanzó por tanto la madurez fisiológica. Para el cálculo del momento de madurez fisiológica, se consideró que la duración del período entre R1 (sedas visibles) y R2 (estadio de “ampollitas”; momento en que comienza el período de llenado efectivo del grano) es del 25% del período comprendido entre R1 y

R6 (madurez fisiológica) tal y como proponen Johnson y Tanner (1972). En los ensayos complementarios, se realizó también la cosecha a madurez de ensilado, pero al no ser preciso levantar el maíz para implantar el segundo cultivo de la rotación, fue posible determinar en campo el momento de madurez fisiológica.

2.2.3.2. ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR (IAF)

La determinación del índice de área foliar (IAF; Watson (1947)) se realizó con las mismas muestras foliares utilizadas para la determinación de la biomasa. Para estimar el peso específico de las hojas, parámetro necesario para el cálculo del IAF, se midió la superficie de una submuestra de hojas verdes, previamente a su secado en estufa de ventilación forzada, mediante un medidor de área foliar automático (“Image Analysis System” de Delta-T Devices).

2.2.4. DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES GENÉTICOS DEL CV. CLARICA

Para la estimación del número potencial de granos por planta (G2) y la tasa potencial de crecimiento de los granos (G3), se estableció en el año 1999, en una parcela adyacente al ensayo principal y en suelo de características similares, un ensayo complementario de baja densidad, siguiendo la metodología propuesta por Ritchie *et al.* (1986). Se sembraron 20 filas de 15 m de longitud, con una separación de .75 m entre filas y con una densidad de siembra baja (4.8 pl. m⁻² en cosecha). La fecha de siembra (28 de mayo de 1999) fue la misma de la 1ª fecha de siembra de ese año. G2 se estimó en cosecha, contando el número de granos por planta en veinte plantas elegidas al azar. G3 se estimó a partir de muestreos secuenciales a lo largo del período de llenado del grano. Los muestreos consistieron en dos repeticiones de seis plantas cada una, elegidas al azar durante el llenado del grano (23 y 30 de agosto; 6, 14, 22 y 27 de septiembre) y

la tasa de crecimiento de los granos se estimó por regresión lineal a partir de los granos de la zona media de las espigas. Los datos de los dos últimos muestreos se excluyeron de la regresión debido a que las temperaturas medias en esas fechas eran inferiores a 20 °C (ver **Tabla 15**), y por tanto inferiores a las recomendadas por Ritchie *et al.* (1986) para la determinación de G3. Estos autores consideran que la tasa de crecimiento del grano puede verse reducida cuando la temperatura baja de este umbral.

Por su parte, no es posible determinar el coeficiente genético P1 (**Tabla 12**) mediante un simple seguimiento fenológico visual de los ensayos de campo. Para ello se ha seguido también la metodología propuesta por Ritchie *et al.* (1986), consistente en determinar el momento en el que la yema apical pasa a reproductora, mediante la disección de la planta y la observación de la yema apical con una lupa binocular. Entonces, P1 se puede calcular como la suma de grados día (temperatura base de 8 °C), desde la emergencia hasta 4 días antes de la transformación de la yema apical en reproductora. Se consideró que la yema apical pasaba de vegetativa a reproductora en el momento en que los ápices observados mostraban claros signos de ramificación (Bonnett, 1966; Tollenaar y Hunter, 1983). La transformación de la yema apical en reproductora tiene lugar cuando la planta se encuentra en los estadios de 5-6 hojas con el “collar” visible. Cuando el cultivo se hallaba en torno a estos estadios, se realizaron en todos los años experimentales y en todos los tratamientos, observaciones con lupa binocular cada 2-3 días con el objetivo de estimar el valor de P1. Éste sirvió de punto de partida para minimizar, mediante numerosas iteraciones, la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados medios del error (RMSE; ver 2.2.9.) de la fecha de emisión de sedas estimada por el modelo. Finalmente, con el valor retenido para P1 (**Tabla 12**), la fecha de emisión de sedas (floración femenina) fue estimada por el modelo con un error máximo de 5 días.

Finalmente, en lo que respecta a P2 (**Tabla 12**), el coeficiente que cuantifica la sensibilidad al fotoperíodo del cv., se partió de la hipótesis de que el cv. Clarica, como la mayor parte de las variedades de ciclo corto (Ritchie *et al.*, 1986) es insensible al fotoperíodo ($P2 = 0.0$).

La fecha de madurez fisiológica, necesaria para la determinación de P5 (**Tabla 12**), se estimó del modo descrito en 2.2.3.1. Al igual que para P1, el cálculo de P5 se realizó

usando todos los datos experimentales, las temperaturas máximas y mínimas del período, y una temperatura base de 8 °C. Con el valor de P5 retenido tras minimizar RMSE con las observaciones obtenidas en los ocho tratamientos de regadío (**Tabla 12**), el error máximo detectado en la fecha de madurez fisiológica estimada por el modelo fue de 9 días. Los mayores errores en las estimaciones de madurez fisiológica se observaron en las fechas de siembra más tardías, probablemente debido a una acumulación más lenta del tiempo térmico con las bajas temperaturas registradas al final del ciclo del cultivo.

2.2.5. CARACTERÍSTICAS DEL PERFIL DEL SUELO, MEDIDAS DEL CONTENIDO DE AGUA DEL SUELO Y CONDICIONES INICIALES EMPLEADAS EN LAS SIMULACIONES

La densidad aparente, textura y contenido de carbono orgánico de los diferentes horizontes se determinaron en dos puntos del campo de ensayo. Estos datos se incluyeron en los archivos que definen las características del suelo en los modelos empleados (**Tabla 18**).

El límite superior de drenaje o capacidad de campo (DUL(L); % vol) y el límite inferior o punto de marchitez permanente (LL(L); %vol) de cada horizonte del perfil del suelo se estimaron, con cuatro repeticiones, mediante el método gravimétrico y teniendo en cuenta la densidad aparente (**Tabla 19**). El DUL(L) de cada horizonte se midió el 12 de abril de 1999, siete días después de un riego suficientemente abundante para garantizar la recarga total del perfil. Durante este período se cubrió la superficie del suelo con polietileno para evitar la evaporación de agua del suelo. Por su parte, LL se midió en los tratamientos de secano (S) al final de la estación de crecimiento de 1998 (3 de septiembre de 1998), una vez que los cultivos de secano hubieran extraído toda el agua posible, en un año agrícola en que las precipitaciones medidas desde el 11 de Julio fueron 20.4 mm y prácticamente nulas en los últimos 18 días del período. Por ser el suelo muy homogéneo a partir de 60 cm de profundidad, y las raíces no suficientemente

densas por debajo de 75 cm para extraer toda el agua disponible, se fijó el valor de LL para todos los horizontes situados por debajo de 75 cm de profundidad en el valor obtenido para el de 60-75 cm.

Tabla 18. Características de los diferentes horizontes del perfil del suelo experimental utilizadas en las simulaciones

Horizonte (cm)	Fracción arcilla (%)	Fracción limo (%)	Fracción gruesa (%)	C orgánico (%)	Densidad aparente (g cm⁻³)	LL^a (% vol.)	DUL^a (% vol.)	SAT^a (% vol.)	SRGF^b
0-15	12.8	28.0	7.0	4.4	1.29	7.8	31.5	42.4	1.00
15-30	14.4	17.0	7.0	3.3	1.33	7.8	30.5	41.8	0.64
30-45	7.4	12.6	6.0	2.4	1.28	8.3	23.0	44.6	0.47
45-60	7.2	12.3	5.0	1.9	1.46	8.5	24.5	39.1	0.35
60-90	7.2	12.3	5.0	1.9	1.50	8.8	25.0	37.7	0.22
90-120	7.2	12.3	5.0	1.9	1.63	8.8	22.0	33.1	0.12
120-150	7.2	12.3	5.0	1.9	1.63	8.8	22.0	3.1	0.07

^a DUL, LL y SAT: capacidad de campo, punto de marchitez permanente y contenido de agua del suelo a saturación, respectivamente

^b Función de enraizamiento preferente utilizada por el modelo CERES-Maize, normalizada en 1.00 para el horizonte superior.

Tabla 19. Valores de capacidad de campo (DUL) y de punto de marchitez permanente (LL) determinados experimentalmente para cada uno de los horizontes del perfil del suelo. Cada dato es la media de 4 repeticiones

Horizonte (cm)	DUL^a (% vol) (desviaciones estándares entre paréntesis)	LL^b (% vol) (desviaciones estándares entre paréntesis)
<0-15	31.68 (0.85)	7.82 (0.56)
15-30	30.87 (0.39)	7.83 (1.21)
30-45	22.69 (1.13)	8.30 (0.47)
45-60	24.01 (4.00)	8.48 (0.95)
60-75	23.85 (4.74)	8.85 (2.27)
75-90	24.49 (1.82)	--
90-105	21.42 (1.53)	--

^a La medición de DUL se llevó a cabo fuera del campo de ensayo el 12 de abril de 1999, 7 días después de un riego abundante. El suelo fue cubierto con polietileno inmediatamente después del riego para evitar la evaporación

^b La determinación de LL se realizó el 3 de septiembre de 1998, una vez que el maíz hubo extraído tanta agua como posible en una estación de crecimiento donde sólo se midieron 20.4 mm de precipitación entre el 11 de Julio y esta fecha.

Se tomaron medidas gravimétricas hasta 90 cm de profundidad en todas las fechas de siembra, excepto la de 2001 donde los datos de humedad de suelo se tomaron 3 días después de la siembra (22 de Mayo), con la finalidad de determinar el contenido hídrico inicial de los diferentes horizontes del perfil del suelo (**Tabla 20**). Estos datos, cruciales para las simulaciones del balance hídrico en seco, son medias de tres repeticiones. Además, considerando que *Lolium multiflorum* L. es un cultivo de enraizamiento poco profundo, y que el invierno y comienzo de la primavera en Galicia son lluviosos y tienen una baja demanda evapotranspirativa, se consideró que por debajo de 90 cm de profundidad, el suelo estaba a capacidad de campo (DUL) en todas las fechas de siembra.

Tabla 20. Contenido inicial de agua, determinado por gravimetría, de los diferentes horizontes del perfil del suelo de los siete tratamientos de secano estudiados. Cada dato es la media de tres repeticiones

Horizonte (cm)	1998 14 de Mayo	1999-1 ^a 24 de Mayo	1999-2 ^a 7 de Junio	2000-1 ^a 18 de Mayo	2000-2 ^a 8 de Junio	2001 22 de Mayo	2002 8 de Mayo
-----% vol-----							
0-15	28.5	26.5	20.5	25.3	20.2	29.5	18.0
15-30	26.5	24.3	18.5	23.1	20.0	29.8	14.1
30-45	21.5	21.0	19.9	20.7	18.3	23.3	14.9
45-60	23.1	22.9	21.2	20.7	18.3	23.1	15.0
60-90	22.2	21.5	18.7	17.7	13.0	27.6	16.5

Finalmente, con la finalidad de realizar un seguimiento de las extracciones de agua de los tratamientos de secano, durante el ciclo del cultivo de 2001, se hicieron mediciones gravimétricas del contenido de agua del suelo, con tres repeticiones, hasta 150 cm de profundidad en cuatro fechas: 22 de junio, 5 de Julio, 31 de Julio y 26 de septiembre (**Fig. 14**).

2.2.6. HUMEDAD VOLUMÉTRICA DEL SUELO A SATURACIÓN, FUNCIÓN DE ENRAÍZAMIENTO PREFERENTE EN EL PERFIL DEL SUELO UTILIZADA Y PROFUNDIDAD DE ENRAÍZAMIENTO. AJUSTES FINALES DE DUL PARA LAS SIMULACIONES EN CONDICIONES DE SECANO

Se utilizó el algoritmo incluido en el DSSAT-4.0 para estimar el contenido de agua del suelo a saturación (SAT(L); % vol.) y la función de enraizamiento preferente para cada uno de los horizontes del perfil del suelo (SRGF(L)) (ver **Tabla 18**), a partir de mediciones de diferentes características del suelo (espesor y profundidad del horizonte, fracciones de arcilla, limo y carbono orgánico). Se usó este mismo algoritmo para establecer el albedo del suelo (SALB; fracción) en 0.13, el límite de evaporación de la fase 1 del proceso de secado del suelo (SLU1; mm) en 6.0 mm, la tasa de drenaje

(SLDR; fracción d^{-1}) en $0.60 d^{-1}$, y el número de la curva de escorrentía del suelo (SLRO; Soil Conservation Service) en 73.

Los valores de LL(L), incluidos en el archivo de suelo (SOIL.SOL) para ejecutar las simulaciones con el modelo se obtuvieron siguiendo el método descrito en 2.2.5 (**Tabla 19**). Del mismo modo, los valores de DUL(L) incluidos en el archivo para las simulaciones proceden de los datos anteriormente descritos en la **Tabla 19**, aunque se realizaron ajustes menores (menos del 1%) en los valores determinados experimentalmente para mejorar el ajuste de las simulaciones a la dinámica de extracción de agua medida en el tratamiento de secano del 2001.

2.2.7. VERSIONES DE CERES-Maize EMPLEADAS

Las tres versiones de CERES-Maize utilizadas en este trabajo de Tesis Doctoral pueden obtenerse del modo siguiente: (1) los archivos FORTRAN y ejecutables de CERES-3.5 y CERES-4.0, en la página Web del “International Consortium for Agricultural Systems Applications (DSSAT)” (<http://www.icasa.net/dssat/index.html>); (2) los archivos FORTRAN y ejecutables de CERES-2003, poniéndose en contacto con J.R. Kiniry (USDA; EEUU).

2.2.8. SIMULACIONES

En este trabajo, todas las simulaciones realizadas en condiciones no limitantes del medio (tratamientos de regadío (R)), con las tres versiones de CERES-Maize, se llevaron a cabo con la opción de balance hídrico activada y utilizando la ecuación de Priestley-Taylor tal como la formuló Ritchie (Ritchie, 1985) para estimar la evapotranspiración potencial del cultivo (ET_p). Además, se emplearon las características del suelo antes definidas, y los contenidos de agua del suelo medidos en

el momento de la siembra. Como los ensayos de campo se plantearon para que el nitrógeno no fuera limitante, se optó por no activar la opción de balance de N.

Para analizar la capacidad de la versión CERES-4.0 de predecir el efecto del déficit hídrico en los tratamientos de secano (S) sobre la producción de biomasa y grano, las simulaciones se llevaron a cabo del mismo modo indicado para los tratamientos R, pero se emplearon dos de las ecuaciones disponibles para calcular ETo: (1) la de Priestley-Taylor tal como la formuló Ritchie (PT; Ritchie (1985)) y (2) la de Penman-Monteith-FAO56 (P-FAO56; Allen *et al.* (1998)).

2.2.9. PROCEDIMIENTOS ESTADÍSTICOS Y GRÁFICOS EMPLEADOS PARA EVALUAR LAS DIFERENTES VERSIONES ESTUDIADAS DE CERES-Maize, OPCIONES DE CÁLCULO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL, COEFICIENTES DE EXTINCIÓN Y MODIFICACIONES DEL MODELO

Para evaluar el ajuste de las predicciones de las diferentes versiones de CERES-Maize y opciones de balance hídrico estudiadas, con los parámetros medidos en los campos de ensayo, se han utilizado los criterios siguientes: (1) ordenada (*a*) y pendiente (*b*) de la regresión lineal entre valores simulados por el modelo y medidos de biomasa aérea en cosecha, rendimiento de grano en cosecha e IAF máximo de los tratamientos objeto de estudio, R o S respectivamente; (2) la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados medios del error (RMSE); y (3) un índice de ajuste (*d*; Willmott (1982)) que resulta ser un indicador agregado global de mayor utilidad que R^2 .

RMSE y *d* responden a las siguientes fórmulas:

$$RMSE = \left[N^{-1} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \right]^{0.5} \quad [25]$$

$$d = 1 - \left[\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 / \sum_{i=1}^n (|P_i| + |O_i|)^2 \right] \quad [26]$$

donde N es el número total de observaciones, O_i y P_i son los valores observados y estimados del i ésimo par de datos, $P'_i = P_i - \bar{O}$ (media de las observaciones) y $O'_i = O_i - \bar{O}$.

Según Wilmott (1982), el ajuste del modelo mejora a medida que el índice de ajuste d se va acercando a la unidad y RMSE se aproxima a cero.

Con la finalidad de evaluar su ajuste, se compararon visualmente los gráficos de estimaciones temporales de biomas, grano e IAF obtenidos con las diferentes versiones del modelo, y los resultados de los diferentes muestreos secuenciales realizados a lo largo del ciclo de crecimiento del cultivo.

Además, para completar el análisis de la habilidad del modelo para simular correctamente el efecto del déficit hídrico sobre la reducción de la producción de biomasa y de grano, teniendo en cuenta que como era de esperar las predicciones de los tratamientos regados ya arrojan algunos errores, se decidió calcular los mismos estadísticos descritos más arriba a las diferencias entre regadío y secano: (Estimado R – Estimado S) vs. (Observado R – Observado S).

2.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.3.1. EVALUACIÓN DE TRES VERSIONES DEL MODELO CERES-Maize BAJO CONDICIONES NO LIMITANTES DEL MEDIO

2.3.1.1. PREDICCIÓN DE LA FENOLOGÍA

La determinación de los coeficientes genéticos del cultivar (cv.) Clarica (P1, P5, G2 y G3; **Tabla 12**) se realizó del modo descrito en la sección de Materiales y Métodos del segundo capítulo de este trabajo (2.2.4). Los valores retenidos para estos coeficientes figuran en la **Tabla 12**. Se fijó para P2 un valor de cero, ya que no se detectó que este cv. fuera sensible al fotoperíodo y además es el valor por defecto para cvs. de ciclo corto (Ritchie *et al.*, 1986). La regresión lineal utilizada para estimar G3 dio un R^2 de 0.998. Con estos coeficientes genéticos, las tres versiones de CERES-Maize consiguieron estimar correctamente la fenología de los siete tratamientos de regadío de los diferentes años experimentales y fechas de siembra. La fecha estimada de emergencia del cultivo fue siempre demasiado tardía (1.2 días (RMSE = 1.6) para CERES-2003; 2.4 días (RMSE = 2.6) para CERES-3.5 y CERES-4.0). Por su parte, la fecha de floración calculada por los tres modelos tuvo un error medio inferior a 2.5 días (RMSE < 3.2). Ante estos hechos, se consideró que la precisión de las estimaciones de la fenología de las tres versiones del modelo era equivalente. Sin embargo, hay que señalar que la metodología que propusieron Ritchie *et al.* (1986) para estimar G2 y G3, en un ensayo de campo a baja densidad de plantas y en un entorno donde la temperatura media diaria oscila entre 20 y 30 °C, presenta alguna inconsistencia. Se supone que este rango de temperaturas es el óptimo para el llenado de grano. No obstante, si se consideran las diferentes variantes de la función RGFILL, este supuesto se cumple en CERES-4.0 pero no en CERES-2003 o CERES-3.5 ya que en estos casos, como en el

modelo original CERES-Maize (Jones y Kiniry, 1986), el óptimo de temperatura para el llenado de grano es de 26 °C (**Fig. 9**).

2.3.1.2. PRECISIÓN A LO LARGO DEL CICLO, DE LAS ESTIMACIONES DE BIOMASA, GRANO E ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR (IAF) DE LAS DIFERENTES VERSIONES DE CERES-Maize

Las simulaciones de biomasa, grano e IAF de las tres versiones del modelo fueron diferentes (**Figs. 10 y 11**). CERES-4.0 simuló siempre la mayor cantidad de biomasa, mientras que CERES-2003 dio, en general, el menor valor para una fecha de siembra dada. Incluso en el caso de CERES-4.0, la línea simulada de acumulación de biomasa estuvo frecuentemente por debajo de los datos experimentales, excepto en los tratamientos correspondientes a la segunda fecha de siembra de 1999 y a 2001. Por lo tanto, las tres versiones estudiadas, y especialmente CERES-2003, tendieron a infraestimar la biomasa aérea durante el ciclo de cultivo. Cuando la evaluación de las predicciones se centra en los datos de cosecha, esta situación es menos perceptible: CERES-4.0 incluso llega a sobreestimar ligeramente la biomasa media producida por los ocho tratamientos de regadío. Es conveniente hacer constar que las pequeñas superficies de muestreo (los muestreos a lo largo del ciclo fueron de 0.5 m²) pueden tender a sobreestimar la biomasa real presente en la parcela, por lo que los datos de cosecha, obtenidos sobre mayores superficies (6 m²), resultan más fiables. Esta afirmación se ve respaldada por el hecho de que los coeficientes de variación resultaron ser aproximadamente cuatro veces mayores (aprox. 12%) en los muestreos llevados a cabo durante el ciclo que en los de cosecha (aprox. 3%). Además, como la “literatura científica gris” señala, los muestreos de pequeñas dimensiones, pueden conducir a sobreestimaciones de las producciones entre 0 y 30% en parcelas de maíz aparentemente homogéneas. Los análisis estadísticos realizados con todos los datos obtenidos a lo largo del ciclo confirman que las mejores predicciones de biomasa se obtuvieron con CERES-4.0 (**Tabla 21**; pendiente más cercana a 1.0 y ordenada en el origen más cercana a 0.0 de la regresión lineal de valores simulados *versus* observados,

menor RMSE, y mayor índice d). Las simulaciones de CERES-3.5 fueron similares a las de CERES-4.0 excepto durante la fase de llenado de grano. CERES-2003 dio los peores resultados. Una mirada más atenta a las curvas de acumulación de biomasa de CERES-2003 (**Fig. 10**) muestra que en todos los tratamientos estas curvas tienen un inesperado comportamiento errático (líneas con pendientes alternativamente positivas y negativas), durante la mayor parte de la fase de llenado de grano. Este comportamiento errático de las curvas de acumulación de biomasa no se correspondió con las observaciones realizadas en el campo y nunca ha sido descrito en la literatura científica para ensayos realizados en condiciones no limitantes del medio. Por tanto, la presencia de cambios erráticos en la biomasa parece sugerir que alguno de los procesos fisiológicos implicados está mal formulado en las ecuaciones FORTRAN. En CERES-2003, durante los períodos en los que el crecimiento de la espiga (GROEAR) es más pequeño que la acumulación potencial de biomasa (PCARB), se produce una remobilización de materia seca de órganos vegetativos hacia el grano con una eficiencia de 0.36. El resultado es que el 64% de la materia seca remobilizada no se tiene en cuenta o es “perdida”, siendo esta la causa del comportamiento errático de la curva.

De modo similar se observa en la **Fig. 10**, que CERES-4.0 tuvo siempre la mayor acumulación de materia seca de grano y CERES-2003 la menor de las tres versiones del modelo, excepto en el año 2001, en el que las predicciones de CERES-2003 superan a las de CERES-3.5. En este año, las producciones de grano medidas fueron muy cercanas o inferiores a la línea de CERES-4.0, lo cual indica que esta versión del modelo tiene una ligera tendencia a sobreestimar el rendimiento en grano. Sin embargo, CERES-3.5 infraestimó la acumulación de grano en la mayor parte de los tratamientos, mientras que CERES-2003 hizo lo mismo en todos ellos. Todos los estadísticos de la **Tabla 21** confirman que las predicciones de biomasa y de grano más precisas se obtuvieron con CERES-4.0 y las menos precisas con CERES-2003.

La evolución temporal del IAF simulada por CERES-4.0 y 3.5 fue prácticamente idéntica y sólo empezó a mostrar ligeras diferencias transcurridos 50 días después de la siembra (**Fig. 11**). A partir de entonces, CERES-4.0 dio generalmente valores de IAF ligeramente superiores a CERES-3.5, excepto en 2001 donde la diferencia fue más sensible. Ambas versiones del modelo simulaban correctamente el IAF hasta valores

cercanos a 3.0; en consecuencia, se puede esperar que tengan una buena estimación de la radiación solar interceptada durante el período crucial del ciclo que precede el momento en que alcanza la cobertura total del suelo. No obstante, se observó, como ya fue descrito para versiones anteriores (Lahrouni *et al.*, 1993; Ben Nouna *et al.*, 2003), que las estimaciones de IAF máximos fueron siempre claramente inferiores a los valores observados, y que la senescencia de final de ciclo se suele iniciar demasiado pronto y fue demasiado rápida comparado con las mediciones de IAF. Este último aspecto puede conducir a infraestimar la interceptación de radiación solar durante el final del ciclo, y en consecuencia el rendimiento en grano (**Fig. 10**). Finalmente, los IAF simulados por CERES-2003 fueron siempre inferiores a los medidos y claramente menores que los de las simulaciones realizadas con CERES-4.0 y 3.5. Los estadísticos obtenidos con los datos tomados a lo largo del ciclo (**Tabla 21**) confirman que nuevamente CERES-4.0 obtuvo las mejores estimaciones de IAF y CERES-2003 las peores. Con la finalidad de mejorar las predicciones, las futuras versiones del modelo deberían tratar de solucionar el problema asociado a la tendencia a infraestimar el IAF y a predecir una senescencia demasiado temprana y acelerada, ya que ha sido detectado y descrito por numerosos investigadores en entornos climáticos muy distintos.

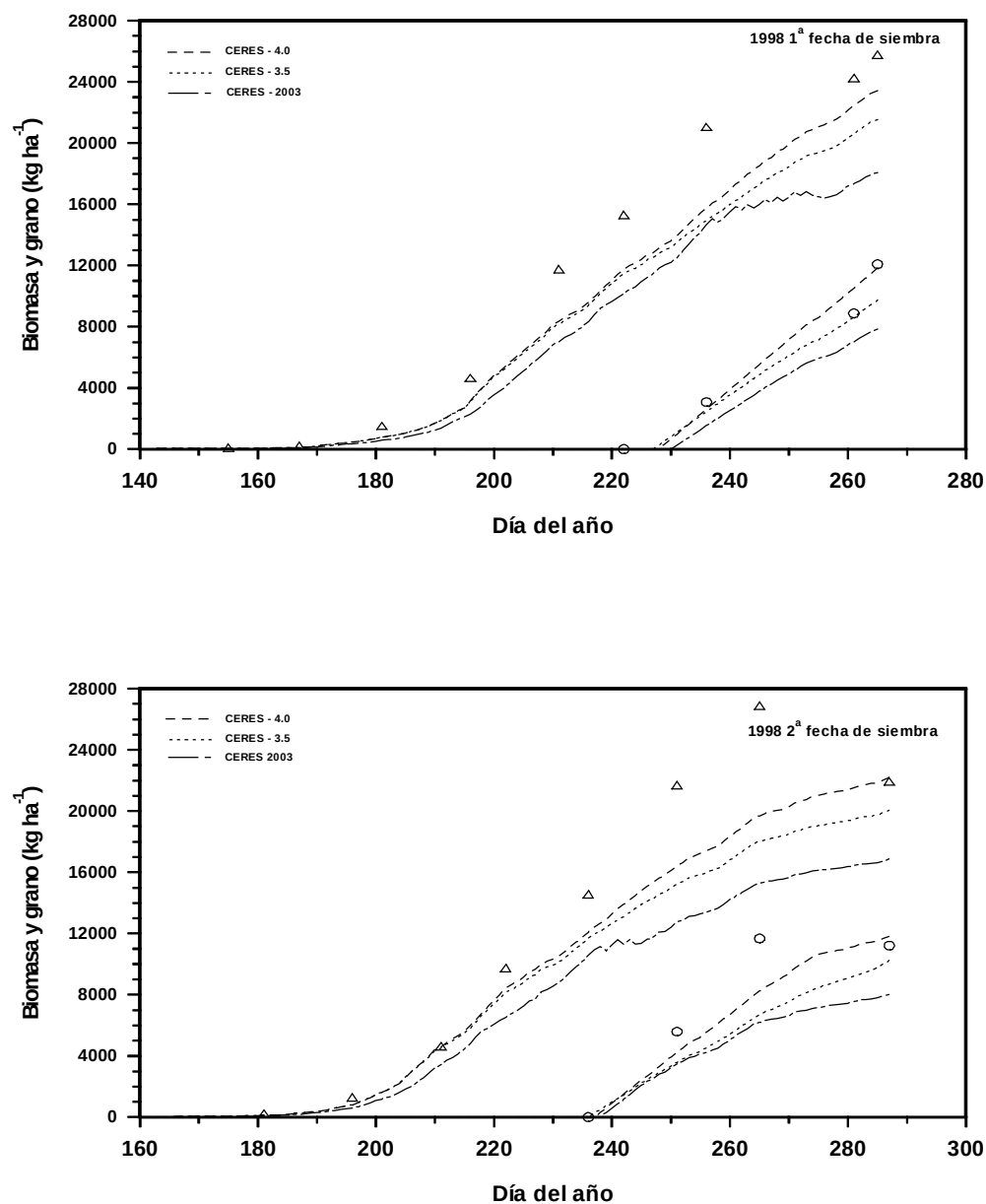


Fig. 10. Evolución de las acumulaciones de biomasa aérea y de grano simuladas con CERES-4.0, CERES-3.5 y CERES-2003 (líneas) y observadas (puntos; ○ y △, respectivamente) para el cv. Clarica cultivado bajo condiciones no limitantes del medio en 1998, 1999, 2000 y 2001.

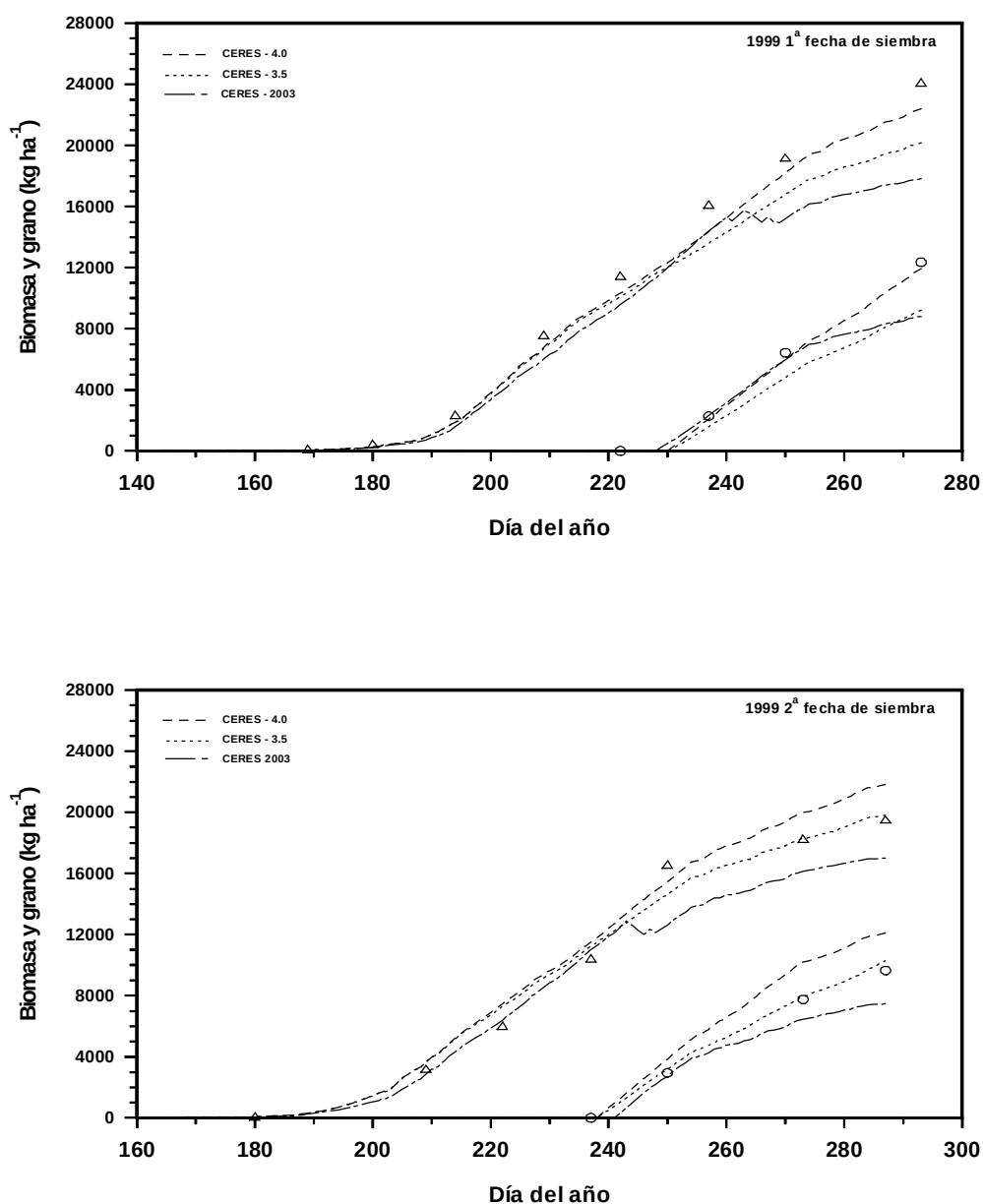


Fig. 10 (continuación). Evolución de las acumulaciones de biomasa aérea y de grano simuladas con CERES-4.0, CERES-3.5 y CERES-2003 (líneas) y observadas (puntos; ○ y △, respectivamente) para el cv. Clarica cultivado bajo condiciones no limitantes del medio en 1998, 1999, 2000 y 2001.

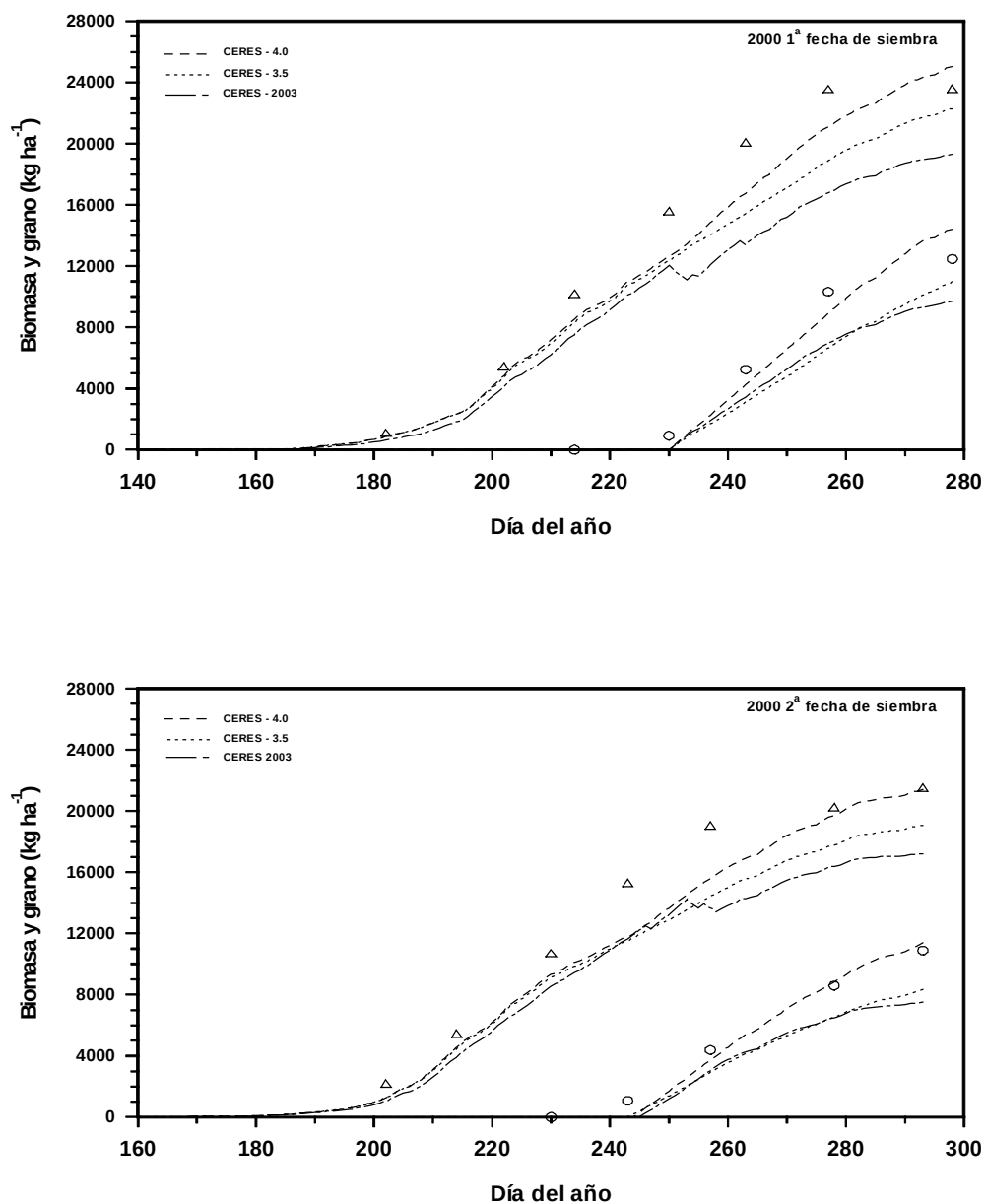


Fig. 10 (continuación). Evolución de las acumulaciones de biomasa aérea y de grano simuladas con CERES-4.0, CERES-3.5 y CERES-2003 (líneas) y observadas (puntos; ○ y △, respectivamente) para el cv. Clarica cultivado bajo condiciones no limitantes del medio en 1998, 1999, 2000 y 2001.

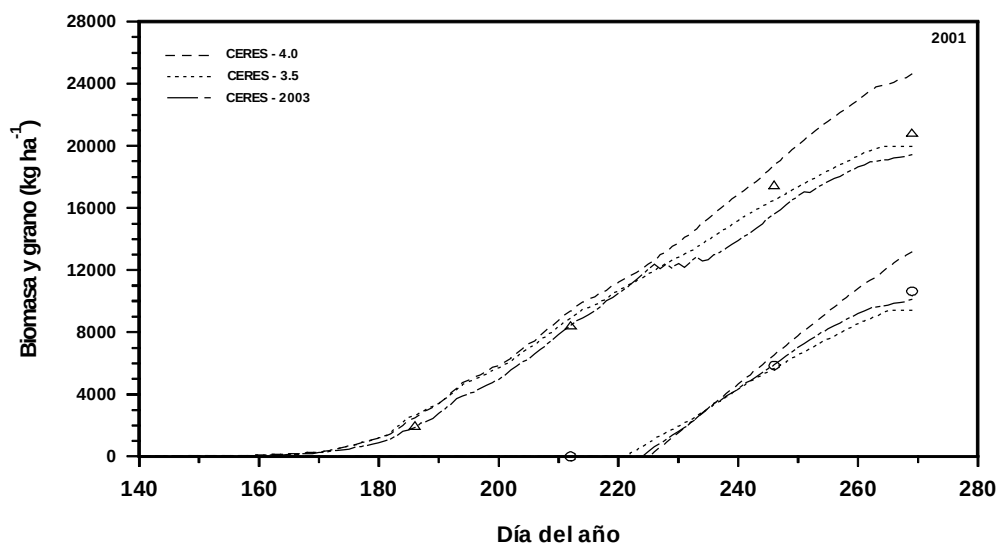


Fig. 10 (continuación). Evolución de las acumulaciones de biomasa aérea y de grano simuladas con CERES-4.0, CERES-3.5 y CERES-2003 (líneas) y observadas (puntos; ○ y △, respectivamente) para el cv. Clarica cultivado bajo condiciones no limitantes del medio en 1998, 1999, 2000 y 2001.

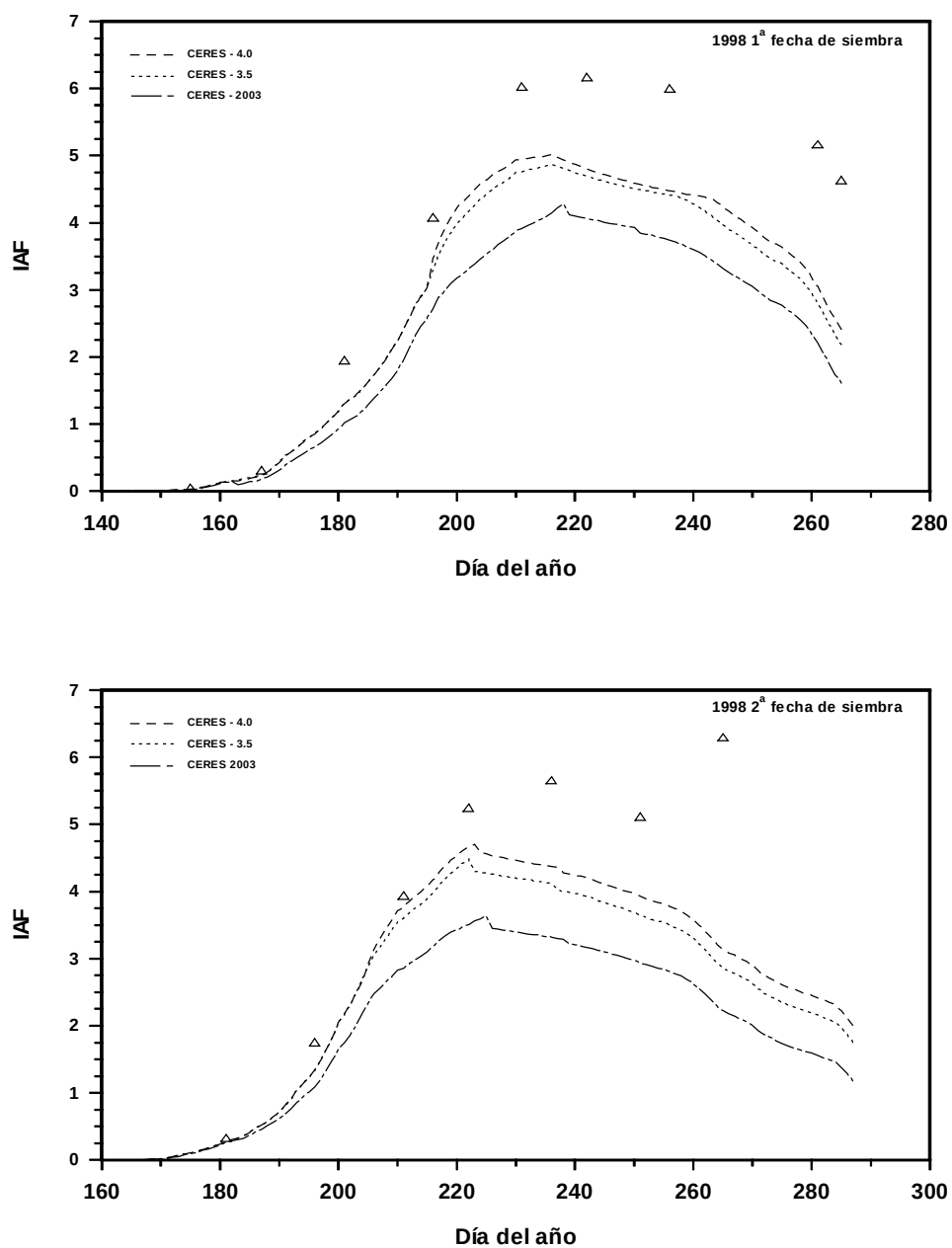


Fig. 11. Evolución del IAF simulado con CERES-4.0, CERES-3.5 y CERES-2003 (líneas) y observado (puntos; ○ y △, respectivamente) para el cv. Clarica cultivado bajo condiciones no limitantes del medio en 1998, 1999, 2000 y 2001.

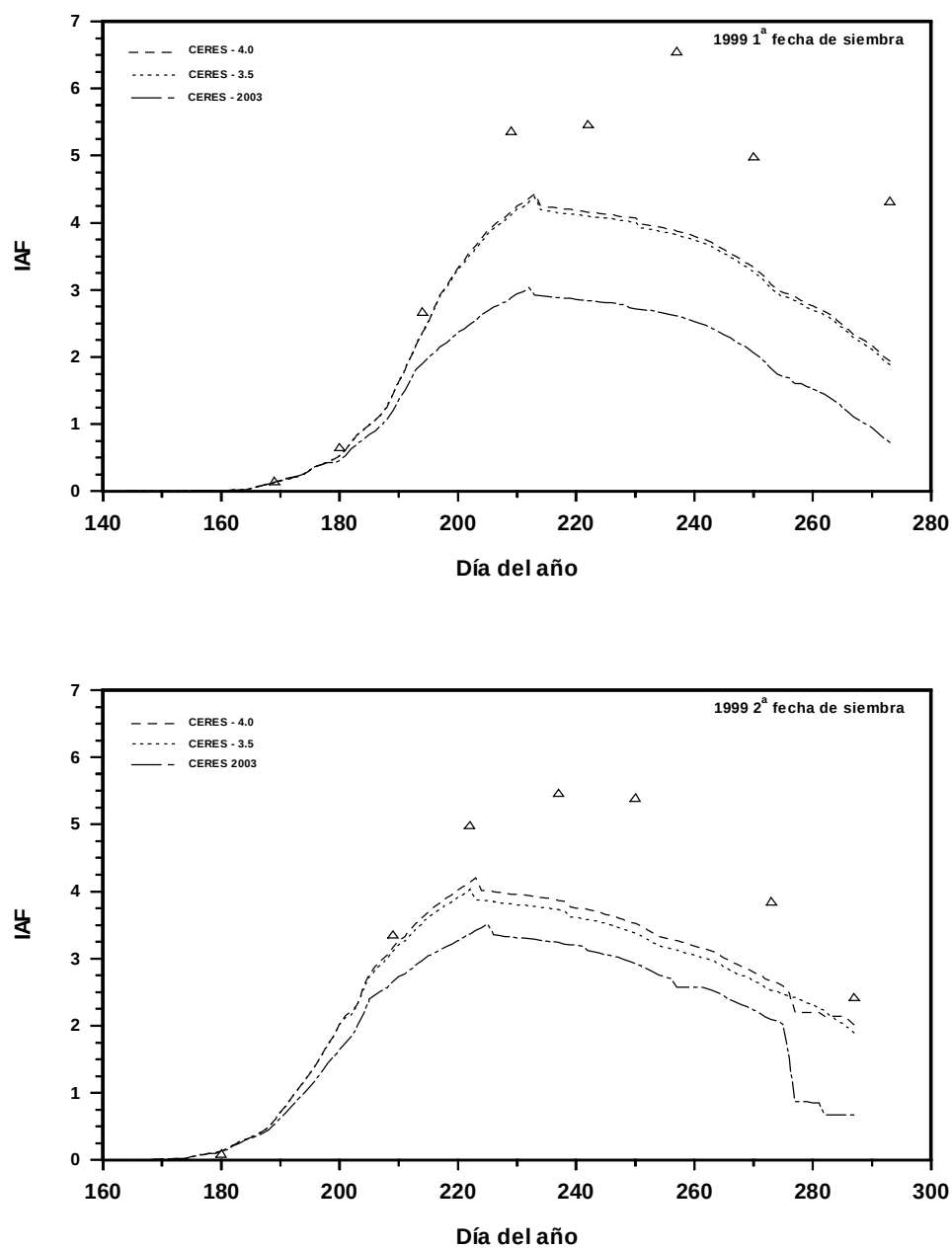


Fig. 11 (continuación). Evolución del IAF simulado con CERES-4.0, CERES-3.5 y CERES-2003 (líneas) y observado (puntos; $\circ$ y $\triangle$, respectivamente) para el cv. Clarica cultivado bajo condiciones no limitantes del medio en 1998, 1999, 2000 y 2001.

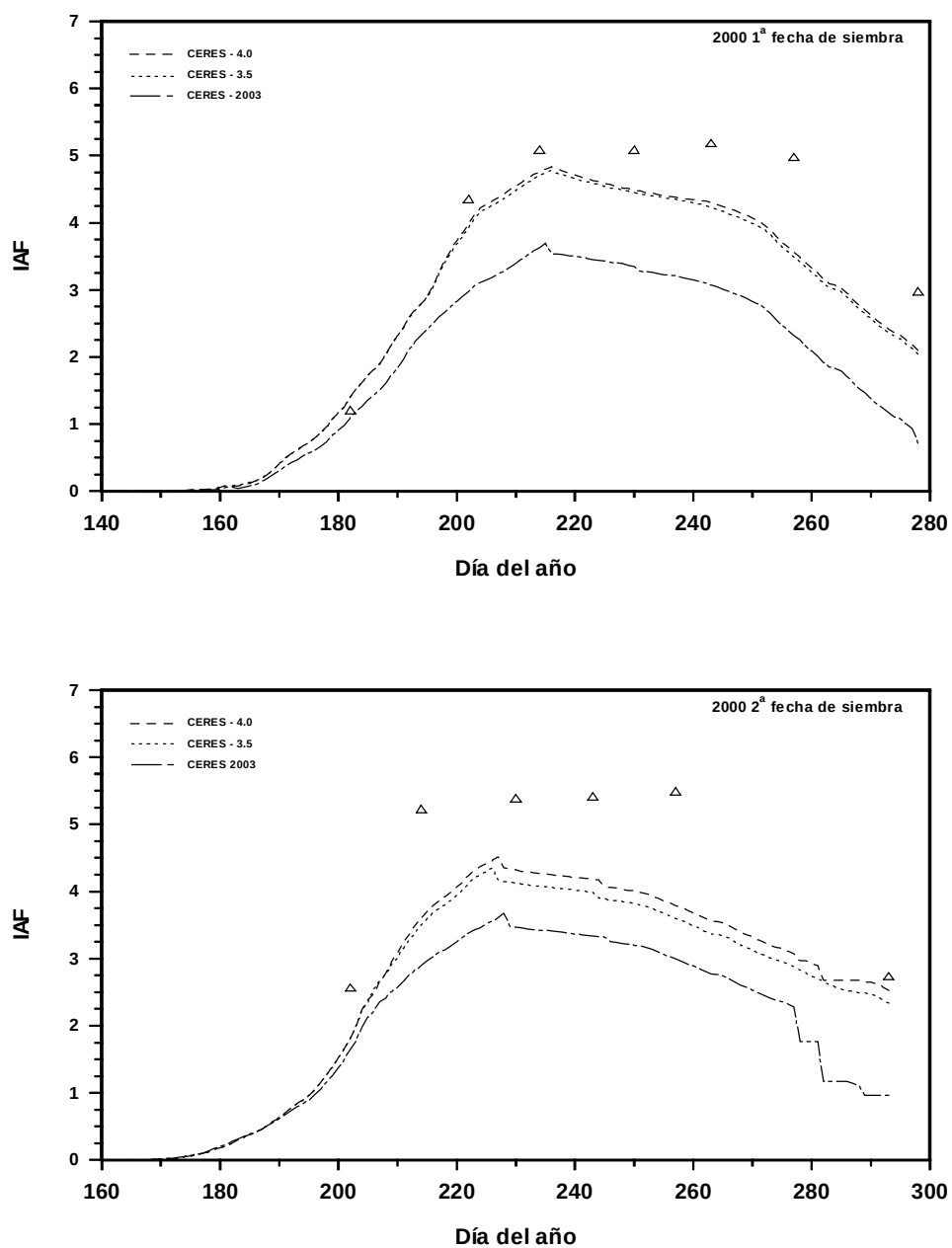


Fig. 11 (continuación). Evolución del IAF simulado con CERES-4.0, CERES-3.5 y CERES-2003 (líneas) y observado (puntos; ○ y △, respectivamente) para el cv. Clarica cultivado bajo condiciones no limitantes del medio en 1998, 1999, 2000 y 2001.

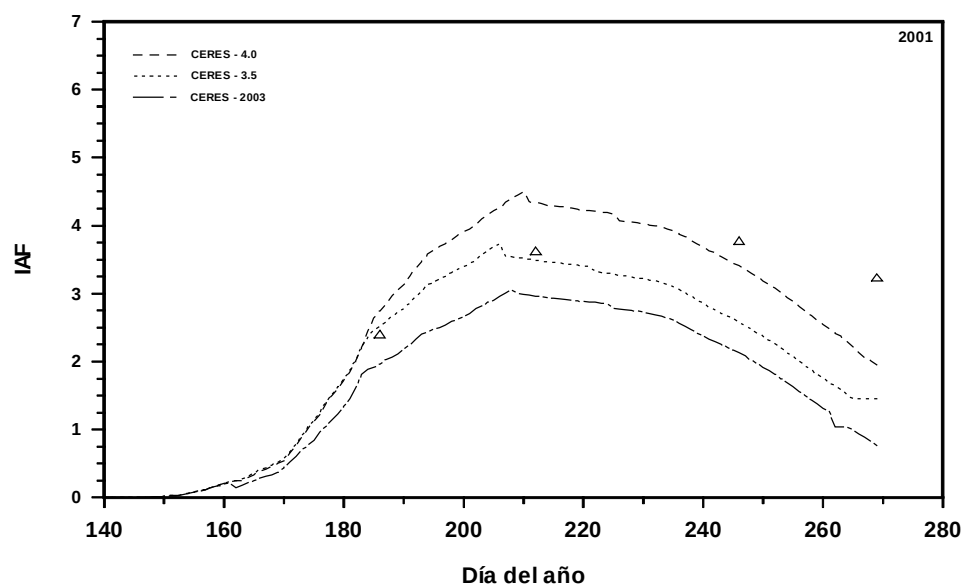


Fig. 11 (continuación). Evolución del IAF simulado con CERES-4.0, CERES-3.5 y CERES-2003 (líneas) y observado (puntos; $\circ$ y $\triangle$, respectivamente) para el cv. Clarica cultivado bajo condiciones no limitantes del medio en 1998, 1999, 2000 y 2001.

2.3.1.3. PRECISIÓN DE LAS ESTIMACIONES DE BIOMASA Y RENDIMIENTO EN GRANO EN COSECHA, Y DE LAS ESTIMACIONES DE IAF MÁXIMO DE LAS DIFERENTES VERSIONES DE CERES-Maize

Los estadísticos calculados con los datos finales de cosecha (amplias superficie de muestreo; ocho tratamientos) (**Tabla 22**) confirman los comentarios anteriormente realizados, apoyándose en los estadísticos calculados con los datos tomados a lo largo del ciclo. Las mejores simulaciones de biomasa total aérea en cosecha se obtuvieron con CERES-4.0 (RMSE = 1974; $d = 0.637$) y las peores con CERES-2003 (RMSE = 4683; $d = 0.360$). CERES-3.5 tuvo una precisión intermedia, pero fue más cercano a CERES-4.0 que a CERES-2003. Lo mismo se puede decir con respecto al rendimiento en grano. Las mediciones realizadas en campo mostraron que para las densidades de plantas experimentales y considerando todos los tratamientos de regadío, las plantas tuvieron una media de 1.08 espigas por planta (media de los 5 tratamientos con fecha de siembra en mayo: 1.15 espiga/planta; media de las 3 tratamientos con fecha de siembra en junio: 1.00 espiga/planta). No se encontraron plantas sin espiga en los muestreos realizados a lo largo del ciclo ni en cosecha. Las tres versiones del modelo, CERES-4.0, CERES-3.5 y CERES-2003, infraestimaron el número medio de granos por metro cuadrado de los ocho tratamientos regados en 21, 27 y 15%, respectivamente. CERES-4.0 y CERES-3.5 sobreestimaron el peso medio de los granos en 38% y 16%, respectivamente. Por su parte, CERES-2003 infraestimó el peso medio de los granos en un 15%. En consecuencia, ninguna de las tres versiones probadas fue capaz de simular correctamente los componentes del rendimiento del cultivo. Es frecuente que los modelos CERES tengan problemas para predecir correctamente estos dos componentes del rendimiento. En este caso, queda claro que CERES-4.0 y CERES-3.5 se beneficiarían de un G2 mayor y de un G3 menor. Las versiones existentes de CERES no contemplan la posibilidad de que la planta pueda tener más de un tallo o de una espiga. Si el modelo fuera capaz de predecir correctamente el número de espigas por planta, el número de granos por superficie estimado estaría ya muy cercano al real. Finalmente, las estimaciones de IAF máximo de CERES-4.0 y CERES-3.5 fueron prácticamente equivalentes (RMSE ≈ 1.0), y mejores que las de CERES-2003 (RMSE = 1.86).

Tabla 21. Análisis estadístico de los datos de todos los muestreos realizados a lo largo del ciclo para la biomasa (kg ha^{-1}), grano (kg ha^{-1}) e IAF simulados por cuatro versiones de CERES-Maize (CERES-4.0, CERES-3.5, CERES-2003 y CERES-4.mod^a) durante los ensayos realizados en condiciones no limitantes del medio entre 1998 y 2001: valores *a* y *b* de la regresión lineal de los valores estimados vs. medidos, raíz cuadrada de la suma de los cuadrados medios del error (RMSE) e índice de ajuste *d* (Willmott, 1982)

Modelo	Variable	<i>a</i>	<i>b</i>	RMSE	<i>d</i>
CERES-4.0	Biomasa	-3.9	0.922	2202	0.982
CERES-3.5	Biomasa	311.7	0.828	2729	0.970
CERES-2003	Biomasa	297.8	0.740	3909	0.935
CERES-4.mod^a	Biomasa	88.4	0.899	2226	0.982
CERES-4.0	Grano	-252.8	1.055	1315	0.980
CERES-3.5	Grano	-134.3	0.825	1785	0.954
CERES-2003	Grano	39.6	0.730	2194	0.924
CERES-4.mod^a	Grano	-111.4	0.914	1334	0.976
CERES-4.0	IAF	0.29	0.694	1.211	0.875
CERES-3.5	IAF	0.25	0.672	1.328	0.852
CERES-2003	IAF	0.08	0.542	1.996	0.720
CERES-4.mod^a	IAF	0.29	0.694	1.211	0.875

^a CERES-4.mod es idéntico a CERES-4.0, excepto que la función RGFILL ha sido sustituida por la función de temperatura propuesta por Wilson *et al.* (1995).

Tabla 22. Medias de la biomasa aérea en cosecha, del rendimiento en grano y del IAF máximo (IAFmáx.) medidos y simulados por cuatro versiones de CERES-Maize (CERES-4.0, CERES-3.5, CERES-2003 y CERES-4.mod^a) durante los ensayos realizados en condiciones no limitantes del medio entre 1998 y 2002, y estadísticos utilizados para estimar la precisión de sus predicciones (raíz cuadrada de la suma de los cuadrados medios del error (RMSE) e índice de ajuste *d* (Willmott, 1982))

Modelo	Variable	Media	RMSE	<i>d</i>
CERES-4.0	Biomasa (kg ha ⁻¹)	22584	1974	0.637
CERES-3.5	Biomasa (kg ha ⁻¹)	20107	2527	0.600
CERES-2003	Biomasa (kg ha ⁻¹)	17732	4863	0.360
CERES-4.mod^a	Biomasa (kg ha ⁻¹)	21847	1682	0.720
Medido	Biomasa (kg ha ⁻¹)	22185		
CERES-4.0	Grano (kg ha ⁻¹)	12137	1472	0.611
CERES-3.5	Grano (kg ha ⁻¹)	9527	1954	0.474
CERES-2003	Grano (kg ha ⁻¹)	8410	2942	0.393
CERES-4.mod^a	Grano (kg ha ⁻¹)	10479	1231	0.652
Medido	Grano (kg ha ⁻¹)	11148		
CERES-4.0	IAFmáx.	4.5	0.93	0.541
CERES-3.5	IAFmáx.	4.3	1.04	0.583
CERES-2003	IAFmáx.	3.5	1.86	0.418
CERES-4.mod^a	IAFmáx.	4.5	0.93	0.541
Medido	IAFmáx.	5.2		

^a CERES-4.mod es idéntico a CERES-4.0, excepto que la función RGFILL ha sido sustituida por la función de temperatura propuesta por Wilson *et al.* (1995).

2.3.1.4. CAUSAS PRINCIPALES DE LAS DIFERENCIAS REGISTRADAS EN LAS SALIDAS DE LAS DIFERENTES VERSIONES DEL MODELO

Se puede apreciar en las **Figs. 8 y 9** que las funciones de temperatura que afectan a EUR (eficiencia en el uso de la radiación; PRFT) y al crecimiento del grano (RGFILL) en CERES-4.0 son distintas de las utilizadas en CERES-3.5 y CERES-2003. Las funciones de CERES-4.0 son menos sensibles a la temperatura ya que tienen una meseta

más amplia. Además, las diferencias en las salidas de las funciones PRFT y RGFILL, son especialmente grandes en el rango de temperaturas que se produce durante las estaciones de crecimiento del maíz o el período de llenado del grano (ver **Figs. 8 y 9**, y **Tabla 23**). Por tanto, es de esperar que en este rango de temperaturas, CERES-4.0 tendrá las mayores predicciones de biomas y de rendimiento de grano. Cuando insertamos la función PRFT de CERES-4.0 dentro del programa FORTRAN de CERES-3.5, este cambio explica el 41 y 20% del incremento en biomasa y rendimiento de grano respectivamente, causado por CERES-4.0. Cuando insertamos la función RGFILL de CERES-4.0 en el programa FORTRAN de CERES-3.5, este cambio explica el 44 y 68% del aumento en biomasa y rendimiento de grano respectivamente, causado por CERES-4.0. Finalmente, cuando se insertan ambas funciones dentro de CERES-3.5, los cambios explican el 92% del aumento en biomasa y el 100% en rendimiento de grano, causado por CERES-4.0. Por tanto, ambas funciones explican casi todas las diferencias en las salidas de estas dos versiones del modelo. Es importante recordar que el programa FORTRAN de CERES-4.0 es modular (y reestructurado a partir de la V3.5) y que en consecuencia el orden de los procesos simulados puede diferir ligeramente entre ambas versiones del modelo, lo cual puede provocar ligeras diferencias en las salidas finales (Jones *et al.*, 2003).

Las diferencias detectadas entre CERES-2003 y CERES-3.5 son más numerosas que las encontradas entre CERES-3.5 y CERES-4.0. Se trató de cambiarlas una por una en CERES-2003 (con la finalidad de asemejarlas a CERES-4.0) y observar los cambios originados en las simulaciones. Cuando se fija el valor de EUR en $4.2 \text{ g MJ(PAR)}^{-1}$ en el programa FORTRAN de CERES-2003 en vez de utilizar la ecuación que hace variar EUR con el déficit de presión de vapor (VPD), el cambio en las salidas de biomasa y rendimiento en grano fue muy pequeño, y representó solamente 4% y menos de 0.5% respectivamente, de las diferencias entre las versiones del modelo.

La reducción de EXT (coeficiente de extinción del PAR dentro de la cubierta) desde 0.65 hasta 0.59, valor equivalente al calculado por CERES-3.5 para la densidad experimental aproximada (10 pl. m^{-2}), provocó una pequeña reducción en la luz interceptada, y en consecuencia de la biomasa y del rendimiento de grano en cosecha (aprox. 3 y 5%, respectivamente).

El cambio de la función de translocación por una que permite un incremento en el peso del grano de 1 g por cada g de pérdida de peso de tallos, tal como está formulado en CERES-3.5, provocó una diferencia considerable. Además de eliminar los sobresaltos de las curvas de acumulación de biomasa, aumentó la biomasa en cosecha en un 12% y el rendimiento de grano en un 18%. Este cambio justificó el 88 y 132% de las diferencias entre las dos versiones del modelo, de biomasa y rendimiento de grano respectivamente. Por lo tanto, sólo con este cambio, CERES-2003 da mayores estimaciones de rendimiento de grano que CERES-3.5. El hecho de que el 36% de la materia seca removilizada se pierda, parece ser el principal motivo de los pobres resultados de las simulaciones realizadas con CERES-2003.

El cambio de las ecuaciones que calculan el número de granos por planta (GPP) provocó una caída de la media de biomasa aérea y del rendimiento de grano estimado en un 2 y 9% respectivamente.

Finalmente, la sustitución de las ecuaciones de cálculo del IAF (por unas similares a las empleadas en CERES-3.5) aumentó la biomasa aérea en cosecha en un 9% y el rendimiento en grano en 5%. En consecuencia, este cambio permite explicar el 38% de las diferencias en biomasa y el 65% en rendimiento de grano, de las diferencias entre las dos versiones del modelo.

Tabla 23. Media de temperatura máxima diaria (TMAX), media de temperatura mínima diaria (TMIN), media de temperatura media diaria (TM = (TMAX + TMIN) * 0.5) durante tres fases del ciclo del cultivo (emergencia-antesis, antesis-principio de llenado de grano y principio de llenado de grano-cosecha) de los distintos tratamientos

Tratamiento	Emergencia-antesis			Antesis-principio de llenado de grano			Principio de llenado de grano-cosecha		
	TMAX	TMIN	TM	TMAX	TMIN	TM	TMAX	TMIN	TM
	-----	-----	-----	-----	°C	-----	-----	-----	-----
1998-1ª fecha	22.3	11.0	16.6	30.2	15.4	22.8	24.9	13.4	19.1
1998-2ª fecha	24.9	12.4	18.6	25.6	15.3	20.5	21.2	11.4	16.3
1999-1ª fecha	23.6	12.3	17.9	23.6	12.9	18.3	22.9	12.2	17.6
1999-2ª fecha	24.5	13.2	18.9	25.3	12.3	18.8	21.1	11.1	16.1
2000-1ª fecha	23.9	11.7	17.8	26.8	12.9	19.8	23.2	10.6	16.9
2000-2ª fecha	24.5	12.5	18.5	24.0	12.1	18.1	21.1	9.3	15.2
2001	23.8	11.3	17.6	25.0	13.1	19.0	23.5	11.4	17.5
2002	21.8	10.4	16.1	25.2	12.8	19.0	23.2	11.2	17.2

2.3.1.5. ¿QUÉ FUNCIONES DE TEMPERATURA SON LAS CORRECTAS?

En este entorno relativamente frío dentro del contexto de las zonas de cultivo del maíz, de las tres versiones de CERES-Maize estudiadas, CERES-4.0 fue la que obtuvo las mejores predicciones de biomasa y rendimiento de grano. Las principales razones que explican la ventaja estimativa de CERES-4.0 son las relacionadas con las nuevas funciones de PRFT y especialmente RGFILL, cuyas temperaturas cardinales están incluidas en el archivo que define las características de la especie (MZCER030.SPE). Estas funciones generan una menor sensibilidad a la temperatura de los procesos de acumulación de biomasa y de grano. ¿Es esto correcto para todo tipo de entornos? Aunque CERES-4.0 fuera la mejor opción para el entorno estudiado, ¿son estas modificaciones de las funciones de temperatura apropiadas para toda variante de entorno de temperaturas?

Muchow *et al.* (1990) desarrollaron un modelo de crecimiento del cultivo de maíz, en el que la EUR no varía con la temperatura, este modelo se probó en entornos donde la temperatura media variaba entre 18.0 y 28.9 °C. Este hecho fue considerado como una evidencia más de que la EUR de la especie C₄ era estable en este rango de temperaturas, algo que ya estaba apoyado por la literatura científica (Brown y Wilson, 1983; Sinclair y Muchow, 1999). Sin embargo, Wilson *et al.* (1995), utilizando su propia base de datos y la de Andrade *et al.* (1993) tuvieron que crear una función de temperatura que modifica EUR para optimizar las estimaciones globales del modelo en distintos entornos que cubrían un amplio rango de temperaturas medias (entre 14.2 y 30.3 °C). En la nueva función de temperatura de Wilson, la EUR es máxima cuando la temperatura media durante las horas de luz (TAVGD) es mayor que 19 °C (cuando la amplitud térmica entre la noche y el día es de 12 °C) y es cero cuando cae por debajo de 11 °C. Cuando TAVGD es inferior a 19 °C, esta función reduce EUR algo más que la presente función PRFT de CERES-4.0 que tiene un primer óptimo de temperatura (Topt1) de 16.5 °C y una temperatura base (Tb) de 6.2 °C (**Fig. 8**). Si se utiliza la función de temperatura de Wilson en el rango de temperaturas registrado durante los ensayos de campo realizados en Lugo (**Tabla 23**), el valor de EUR será generalmente igual al máximo, del mismo modo que lo es cuando se emplea la función PRFT de CERES-4.0

(Fig. 8). Finalmente, mientras el modelo original de Muchow *et al.* (1990) no tenía en cuenta un posible efecto de la temperatura sobre la tasa de incremento del índice de cosecha durante el período de llenado del grano (función con efecto similar a RGFILL), Wilson *et al.* (1995), con la finalidad de mejorar el ajuste del modelo en su rango más amplio de temperaturas experimentales, consideraron que la tasa de incremento del índice de cosecha era máxima mientras la temperatura media adoptaba valores superiores a 19 °C y disminuía linealmente desde este valor umbral hasta cero cuando la temperatura caía por debajo de 8 °C. Esta función es más sensible a la temperatura que la función correspondiente en CERES-4.0, RGFILL (Fig. 9). En el rango de temperaturas registrado durante el período de llenado de grano, las salidas de las funciones RGFILL de CERES-3.5 (idéntica a la de CERES-2003) y CERES-4.0 son bastante diferentes. La función de Wilson *et al.* (1995) da resultados intermedios entre los de CERES-3.5 (la más limitante) y CERES-4.0 (la menos sensible a la temperatura). El hecho de que el peso medio de un grano calculado por CERES-4.0 está más sobreestimado que el obtenido con CERES-3.5 (38% versus 16%) podría ser un indicio de que la función RGFILL de CERES-3.5, más sensible a la temperatura, es más adecuada. La experiencia ha mostrado que conseguir simular correctamente los componentes del rendimiento de los modelos CERES vía G2 y G3 es particularmente difícil. Esto se debe al problema de fijar G2 a partir del número de granos por planta obtenido en un ensayo con baja densidad de siembra, y G3 (tasa de crecimiento del grano) a partir de muestreos sucesivos de granos en este mismo ensayo realizado en un rango de temperatura supuestamente óptimo (el rango de temperaturas medias diarias comprendido entre 20 y 30 °C es demasiado amplio si se define como óptimo 26 °C para la función RGFILL de crecimiento del grano).

Se decidió probar en CERES-4.0 las funciones de temperatura propuestas por Wilson *et al.* (1995) y observar a continuación sus efectos sobre la precisión de las predicciones del modelo. Los cambios no tuvieron consecuencia sobre los IAF simulados (Tablas 21 y 22). Por si sola, la función alternativa de RGFILL produjo una reducción de un 3% de la estimación de biomasa y un 14% del rendimiento de grano en cosecha (Tabla 22). Esto mejoró los índices *d* desde 0.637 hasta 0.720 para la biomasa y desde 0.611 hasta 0.652 para el rendimiento de grano. Con este cambio, la biomasa

media simulada fue muy próxima a la medida, pero el rendimiento en grano simulado fue inferior al medido en un 6%. Por si sola, la función alternativa de PRFT produjo una reducción de un 2% en la biomasa y un 4% del rendimiento en grano en cosecha. Esto permitió mejorar los índices d desde 0.637 hasta 0.682 para la biomasa, y desde 0.611 hasta 0.682 para el rendimiento en grano. Al sustituir ambas funciones por las de Wilson, se produjo una caída del 5 y 14% de la biomasa y del rendimiento en grano, respectivamente. Estos cambios mejoraron los índices d desde 0.637 hasta 0.713 para la biomasa, y desde 0.611 hasta 0.629 para el rendimiento en grano. Por tanto, los cambios individuales tuvieron repercusiones más positivas sobre los valores simulados. Se puede observar que CERES-4.0 con la función de temperatura alternativa de RGFILL propuesta por Wilson *et al.* (1995) (llamada CERES-4.mod) tuvo un ajuste particularmente bueno (**Tabla 22**). Este hecho está confirmado por los estadísticos que tienen en cuenta los datos tomados a lo largo del ciclo (**Tabla 21**), donde se puede comprobar como CERES-4.0 y CERES-4.mod tienen una calidad estimativa equivalente. Si se considera que las mediciones realizadas sobre superficies pequeñas (datos obtenidos a lo largo del ciclo) pueden tender a sobreestimar la biomasa y el grano, se puede inferir que, en este entorno, CERES-4.mod es mejor que CERES-4.0. Finalmente, si se considera el hecho de que las diferentes versiones de CERES-Maize tienden a infraestimar el IAF y a simular una senescencia demasiado rápida del IAF (**Fig. 11**), provocando una reducción de la producción de biomasa y de grano, una vez este aspecto del modelo sea solventado, puede que las dos funciones de temperatura de Wilson *et al.* (1995) en conjunto mejoren las simulaciones de biomasa y rendimiento de grano en cosecha.

2.3.2. EVALUACIÓN DEL MODELO CERES-Maize V-4.0 EN CONDICIONES DE SECANO

En esta parte del trabajo, los siete tratamientos de secano se comparan con los correspondientes tratamientos de regadío (sembrados en la misma fecha y que sirven de referencia para evaluar el efecto del déficit hídrico medido y simulado). Por tanto, al no tener tratamiento de secano correspondiente, se excluye la segunda fecha de siembra de regadío de 1998.

2.3.2.1. RECALIBRACIÓN DE LOS COEFICIENTES GENÉTICOS G2 Y G3

En los apartados anteriores se mostró que, empleando los coeficientes genéticos G2 (número potencial de granos por planta) y G3 (tasa de crecimiento potencial del grano) obtenidos con el ensayo de baja densidad (año 1999; **Tabla 12**), las predicciones de biomasa y grano realizadas por CERES-4.0 para los tratamientos regados pueden considerarse aceptables. Sin embargo, como ya se indicó, CERES-4.0 infraestimó el número medio de granos por metro cuadrado en un 21% y al mismo tiempo sobreestimó el peso de los granos en un 38%.

Por otro lado, si se pretende evaluar la capacidad del modelo CERES-4.0 para simular correctamente el efecto del déficit hídrico sobre la producción y el rendimiento en grano del cultivo del maíz, es conveniente que este mismo modelo simule lo más correctamente posible estas variables, así como los componentes del rendimiento. En el epígrafe 2.3.1.5., se pusieron de manifiesto los problemas derivados de la metodología utilizada para determinar G2 y G3 y se indicó que las predicciones de CERES-4.0 se beneficiarían de un incremento de G2 y de una reducción de G3.

Por ello, y con el fin de partir de unas predicciones más próximas a los resultados experimentales en condiciones no limitantes, que sirvieran de referencia para las comparaciones con las estimaciones de los tratamientos de secano, se calibró G2 y G3 para optimizar el ajuste de las predicciones del modelo con el número de granos por unidad de superficie y el peso medio de un grano medidos.

Tras este cambio ($G2 = 1205.0$ número potencial de granos por planta en vez de 936.0, y $G3 = 5.75 \text{ mg grano}^{-1} \text{ d}^{-1}$ en vez de 8.00), las estimaciones de la biomasa y rendimiento en grano mejoraron (ver gráficos 1:1 de biomasa y rendimiento de grano en la **Fig. 12** y datos al final del párrafo) y las predicciones de peso medio de un grano y número de granos por unidad de superficie fueron muy similares a los datos obtenidos en los muestreos. Las medias observadas y simuladas (7 tratamientos regados) de peso de un grano y número de granos por unidad de superficie en cosecha fueron respectivamente: 231 y 231 mg grano^{-1} (RMSE = 24); 4847 y 4832 número de granos m^{-2} (RMSE = 418). Por su parte, las medias observadas y simuladas (7 tratamientos regados) de biomasa y de rendimiento en grano en cosecha fueron respectivamente: 22228 y 22113 kg ha^{-1} (RMSE = 2064); 11138 y 11184 kg ha^{-1} (RMSE = 1330).

2.3.2.2. ESTIMACIONES DEL MODELO ORIGINAL: ADECUADAS EN LOS TRATAMIENTOS REGADOS PERO INFERIORES A LAS ESPERADAS EN SECANO

Una vez fijadas las características hídricas del suelo (capacidad de campo, punto de marchitez permanente, ...), la función de enraizamiento preferente (SRGF) (**Tabla 18**) y las condiciones iniciales (humedad volumétrica del perfil en el momento de la siembra; **Tabla 20**), se corrió el modelo (CERES-4.0) para los tratamientos regados y de secano con la opción de evapotranspiración que utiliza por defecto (Priestley-Taylor). A pesar de obtener estimaciones correctas de biomasa y rendimiento de grano en cosecha para los tratamientos de regadío (**Fig. 12**), en los tratamientos de secano, si bien las simulaciones mejoraron con la recalibración de los coeficientes $G2$ y $G3$, se pudo comprobar que el modelo infraestimó la biomasa media en cosecha de estos tratamientos en 4228 kg ha^{-1} (RMSE = 5027) y el rendimiento medio de grano en 3323 kg ha^{-1} (RMSE = 3728) (**Tablas 24 y 25**). Además, también fueron siempre bajas las predicciones del índice de cosecha (IC) del modelo para los tratamientos de secano (0.360 estimado *versus* 0.490 medido; **Tabla 26**). Esto es debido en buena medida a que las estimaciones del número de granos continúan siendo demasiado bajas (2479 n°

granos m^{-2} estimado *versus* 3900 medido; **Tabla 27**). La tendencia antes descrita, de que el modelo infraestima la biomasa y el rendimiento en grano en cosecha fue confirmada por los gráficos temporales (**Fig. 13**). En ellos se puede apreciar que las simulaciones predijeron un efecto más precoz que el observado del déficit hídrico sobre la acumulación de la biomasa total aérea y de grano en todos los tratamientos de secano, excepto en 2001.

La fecha de ocurrencia de los principales estadíos de desarrollo no se vio afectada por el déficit hídrico, en las simulaciones ni tampoco en el campo de ensayo (excepto para el tratamiento 2000-secano-1ª fecha, donde la cosecha se adelantó del 4 de Octubre al 25 de Septiembre debido a un estrés hídrico extremo que aceleró la muerte del cultivo). En consecuencia, el modelo simuló correctamente las fases fenológicas del cultivo, tanto en los tratamientos de regadío como en los secanos.

Tabla 24. Biomasa total aérea en cosecha medida y simulada de los tratamientos de secano (S) con la opción de evapotranspiración (ET) usada por defecto por CERES-4.0 y diferentes opciones de ET

Tratamiento	Medido	Simulado	Simulado	Simulado	Simulado	Simulado	Simulado
		PT ^a	PT ^b	PFAO56 ^c	PFAO56 ^d	PFAO56 ^e	PFAO56 ^f
		KEP=0.685	KEP=0.500	KEP=0.685	KEP=0.500	KEP=0.685	KEP=0.500
				Kc=1.00	Kc=1.00	Kc=1.10	Kc=1.10
----- kg ha ⁻¹ -----							
1998-S	16630	11694	13236	15333	17283	13169	15158
1999-S-1^a fecha	15693	13117	15870	15738	18780	14928	17732
1999-S-2^a fecha	16000	12053	15504	15364	18349	14441	17339
2000-S-1^a fecha	17067	8393	10686	9871	12830	9047	11477
2000-S-2^a fecha	12795	8060	9397	9803	11090	9392	10428
2001-S	19080	19964	21662	23008	23286	22086	23076
2002-S	12315	6640	7823	7693	8843	7397	8436
Media	15654	11426	13454	13830	15780	12923	14807
RMSE	--	5027	3604	3772	3072	4211	3295
d	--	0.601	0.740	0.733	0.796	0.685	0.744
RMSE de la dif.	--	5029	3520	3801	3303	4132	3294
d de la dif.	--	0.546	0.698	0.666	0.739	0.638	0.743

^a Ecuación de evapotranspiración de Priestley-Taylor con un coeficiente KEP^g para el reparto entre evaporación y transpiración igual a 0.685

^b Ecuación de evapotranspiración de Priestley-Taylor con un coeficiente KEP^g para el reparto entre evaporación y transpiración igual a 0.500

^c Ecuación de evapotranspiración de Penman-Monteith FAO56 con un coeficiente de cultivo (Kc) igual a 1.00 y KEP^g igual a 0.685

^d Ecuación de evapotranspiración de Penman-Monteith FAO56 con un coeficiente de cultivo (Kc) igual a 1.00 y KEP^g igual a 0.500

^e Ecuación de evapotranspiración de Penman-Monteith FAO56 con un coeficiente de cultivo (Kc) igual a 1.10 y KEP^g igual a 0.685

^f Ecuación de evapotranspiración de Penman-Monteith FAO56 con un coeficiente de cultivo (Kc) igual a 1.10 y KEP^g igual a 0.500

^g KEP: coeficiente de extinción para el reparto de la energía radiante entre evaporación y transpiración.

Tabla 25. Rendimiento de grano en cosecha medido y simulado de los tratamientos de secano (S) con la opción de evapotranspiración (ET) usada por defecto por CERES-4.0 y diferentes opciones de ET

Tratamiento	Medido	Simulado PT ^a KEP=0.685	Simulado PT ^b KEP=0.500	Simulado PFAO56 ^c KEP=0.685 Kc=1.00	Simulado PFAO56 ^d KEP=0.500 Kc=1.00	Simulado PFAO56 ^e KEP=0.685 Kc=1.10	Simulado PFAO56 ^f KEP=0.500 Kc=1.10
----- kg ha ⁻¹ -----							
1998-S	7224	2460	3336	4732	6128	3236	4594
1999-S-1^a fecha	8303	5908	7419	7390	9060	7053	8321
1999-S-2^a fecha	8528	6172	7887	8123	9609	7623	9035
2000-S-1^a fecha	8098	1695	2853	2412	4158	2029	3334
2000-S-2^a fecha	6019	2840	3391	3555	4067	3415	3844
2001-S	10474	9722	10746	11598	11880	10931	11670
2002-S	5451	2038	2382	2504	2804	2357	2649
Media	7728	4405	5431	5759	6821	5235	6207
RMSE	--	3728	2933	2817	2110	3200	2504
d	--	0.548	0.667	0.694	0.804	0.631	0.745
RMSE de la dif.	--	3885	3044	2974	2322	3317	2609
d de la dif.	--	0.529	0.638	0.655	0.750	0.611	0.715

^a Ecuación de evapotranspiración de Priestley-Taylor con un coeficiente KEP^g para el reparto entre evaporación y transpiración igual a 0.685

^b Ecuación de evapotranspiración de Priestley-Taylor con un coeficiente KEP^g para el reparto entre evaporación y transpiración igual a 0.500

^c Ecuación de evapotranspiración de Penman-Monteith FAO56 con un coeficiente de cultivo (Kc) igual a 1.00 y KEP^g igual a 0.685

^d Ecuación de evapotranspiración de Penman-Monteith FAO56 con un coeficiente de cultivo (Kc) igual a 1.00 y KEP^g igual a 0.500

^e Ecuación de evapotranspiración de Penman-Monteith FAO56 con un coeficiente de cultivo (Kc) igual a 1.10 y KEP^g igual a 0.685

^f Ecuación de evapotranspiración de Penman-Monteith FAO56 con un coeficiente de cultivo (Kc) igual a 1.10 y KEP^g igual a 0.500

^g KEP: coeficiente de extinción para el reparto de la energía radiante entre evaporación y transpiración.

Tabla 26. Índice de cosecha medido y simulado de los tratamientos de secano (S) con la opción de evapotranspiración (ET) usada por defecto por CERES-4.0 y diferentes opciones de ET

Tratamiento	Medido	Simulado	Simulado	Simulado	Simulado	Simulado	Simulado
		PT ^a	PT ^b	PFAO56 ^c	PFAO56 ^d	PFAO56 ^e	PFAO56 ^f
		KEP=0.685	KEP=0.500	KEP=0.685	KEP=0.500	KEP=0.685	KEP=0.500
				Kc=1.00	Kc=1.00	Kc=1.10	Kc=1.10
		----- kg ha ⁻¹ -----					
1998-S	0.434	0.210	0.252	0.309	0.357	0.246	0.303
1999-S-1^a fecha	0.529	0.448	0.467	0.470	0.482	0.472	0.469
1999-S-2^a fecha	0.533	0.512	0.509	0.529	0.524	0.528	0.521
2000-S-1^a fecha	0.474	0.202	0.267	0.244	0.324	0.224	0.290
2000-S-2^a fecha	0.470	0.352	0.361	0.363	0.367	0.364	0.369
2001-S	0.549	0.487	0.496	0.504	0.510	0.495	0.506
2002-S	0.443	0.307	0.304	0.325	0.317	0.319	0.314
Media	0.490	0.360	0.380	0.392	0.412	0.378	0.396
RMSE	--	0.155	0.128	0.119	0.092	0.137	0.109
d	--	0.439	0.507	0.520	0.614	0.482	0.561
RMSE de la dif.	--	0.159	0.132	0.124	0.096	0.141	0.113
d de la dif.	--	0.398	0.449	0.477	0.552	0.434	0.501

^a Ecuación de evapotranspiración de Priestley-Taylor con un coeficiente KEP^g para el reparto entre evaporación y transpiración igual a 0.685

^b Ecuación de evapotranspiración de Priestley-Taylor con un coeficiente KEP^g para el reparto entre evaporación y transpiración igual a 0.500

^c Ecuación de evapotranspiración de Penman-Monteith FAO56 con un coeficiente de cultivo (Kc) igual a 1.00 y KEP^g igual a 0.685

^d Ecuación de evapotranspiración de Penman-Monteith FAO56 con un coeficiente de cultivo (Kc) igual a 1.00 y KEP^g igual a 0.500

^e Ecuación de evapotranspiración de Penman-Monteith FAO56 con un coeficiente de cultivo (Kc) igual a 1.10 y KEP^g igual a 0.685

^f Ecuación de evapotranspiración de Penman-Monteith FAO56 con un coeficiente de cultivo (Kc) igual a 1.10 y KEP^g igual a 0.500

^g KEP: coeficiente de extinción para el reparto de la energía radiante entre evaporación y transpiración.

Tabla 27. Número de granos por metro cuadrado medido y simulado de los tratamientos de secano (S) con la opción de evapotranspiración (ET) usada por defecto por CERES-4.0 y diferentes opciones de ET

Tratamiento	Medido	Simulado PT ^a KEP=0.685	Simulado PT ^b KEP=0.500	Simulado PFAO56 ^c KEP=0.685 Kc=1.00	Simulado PFAO56 ^d KEP=0.500 Kc=1.00	Simulado PFAO56 ^e KEP=0.685 Kc=1.10	Simulado PFAO56 ^f KEP=0.500 Kc=1.10
----- kg ha ⁻¹ -----							
1998-S	3555	1414	1893	2709	3520	1868	2618
1999-S-1^a fecha	3937	3491	3887	3735	4346	3613	4086
1999-S-2^a fecha	4645	3752	4201	4373	4768	4209	4582
2000-S-1^a fecha	4215	1223	1579	1662	2273	1431	1812
2000-S-2^a fecha	3428	1695	1926	2048	2243	1973	2147
2001-S	4543	4641	4896	4896	4896	4896	4896
2002-S	2979	1137	1318	1390	1547	1308	1460
Media	3900	2479	2814	2973	3370	2757	3086
RMSE	--	1729	1466	1304	1037	1508	1239
d	--	0.485	0.564	0.607	0.699	0.550	0.635
RMSE de la dif.	--	1834	1583	1399	1140	1618	1363
d de la dif.	--	0.403	0.462	0.509	0.594	0.454	0.523

^a Ecuación de evapotranspiración de Priestley-Taylor con un coeficiente KEP^g para el reparto entre evaporación y transpiración igual a 0.685

^b Ecuación de evapotranspiración de Priestley-Taylor con un coeficiente KEP^g para el reparto entre evaporación y transpiración igual a 0.500

^c Ecuación de evapotranspiración de Penman-Monteith FAO56 con un coeficiente de cultivo (Kc) igual a 1.00 y KEP^g igual a 0.685

^d Ecuación de evapotranspiración de Penman-Monteith FAO56 con un coeficiente de cultivo (Kc) igual a 1.00 y KEP^g igual a 0.500

^e Ecuación de evapotranspiración de Penman-Monteith FAO56 con un coeficiente de cultivo (Kc) igual a 1.10 y KEP^g igual a 0.685

^f Ecuación de evapotranspiración de Penman-Monteith FAO56 con un coeficiente de cultivo (Kc) igual a 1.10 y KEP^g igual a 0.500

^g KEP: coeficiente de extinción para el reparto de la energía radiante entre evaporación y transpiración.

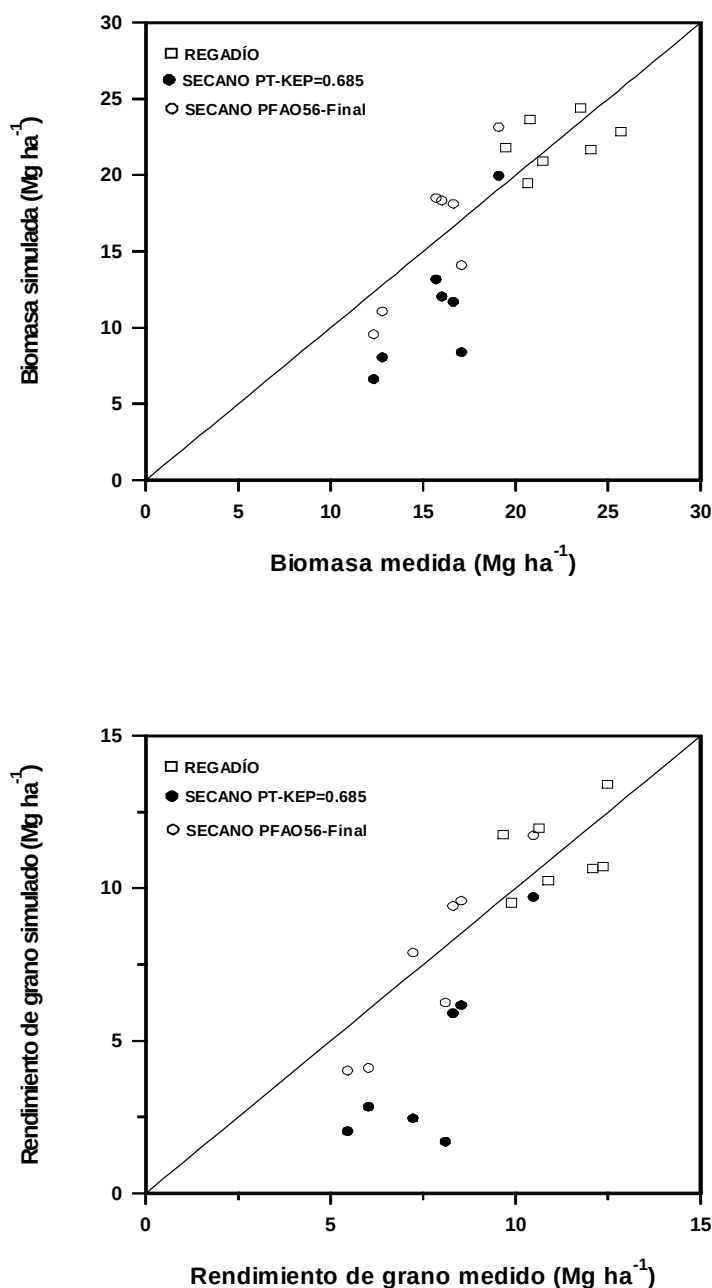


Fig. 12. Valores simulados *versus* medidos de: (a) biomasa total aérea en cosecha y (b) rendimiento de grano, de los tratamientos de secano y de regadío, utilizando diferentes opciones de ET y modificaciones del modelo CERES-4.0. 1.) Opción de ET de Priestley-Taylor con un coeficiente KEP para el reparto entre evaporación y transpiración de 0.685 (PT-KEP=0.685; opción por defecto del modelo); 2.) Opción de ET de Penman-Monteith FAO56 con un KEP=0.500, con la función de Edmeades para calcular el número de granos por planta, y sin efecto directo del contenido de agua del suelo en el cálculo del número de granos por planta (PFAO56-Final). Cada punto representa la media de cuatro repeticiones.

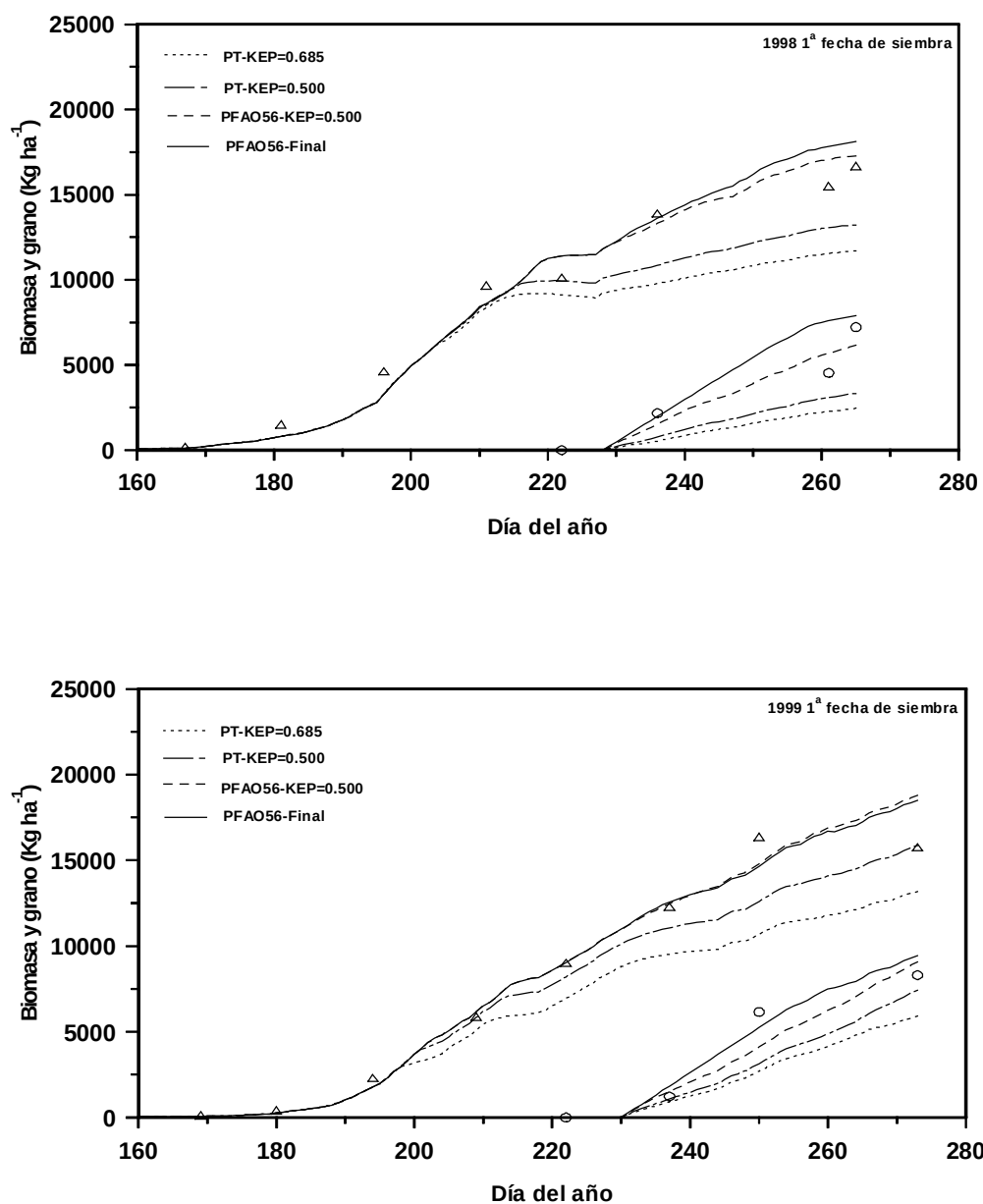


Fig. 13. Evolución de las acumulaciones de biomasa aérea y de grano observadas (puntos) y simuladas (líneas) de cuatro tratamientos de secano (1998, 1999-1ª fecha, 2000-1ª fecha y 2001) obtenidas con diferentes opciones de ET y modificaciones del modelo CERES-4.0. 1.) Opción de ET de Priestley-Taylor con un coeficiente KEP para el reparto entre evaporación y transpiración de 0.685 (PT-KEP=0.685; opción por defecto del modelo); 2.) Opción de ET de Priestley-Taylor con un coeficiente KEP para el reparto entre evaporación y transpiración de 0.500 (PT-KEP=0.500); 3.) Opción de ET de Penman-Monteith FAO56 con un KEP=0.500 (PFAO56-KEP=0.500); 4.) Idéntico a (3) con la función de Edmeades para calcular el número de granos por planta y sin efecto directo del contenido de agua del suelo en el cálculo del número de granos por planta (PFAO56-Final). Cada punto (Δ, biomasa; ○, rendimiento de grano) representa la media de cuatro repeticiones.

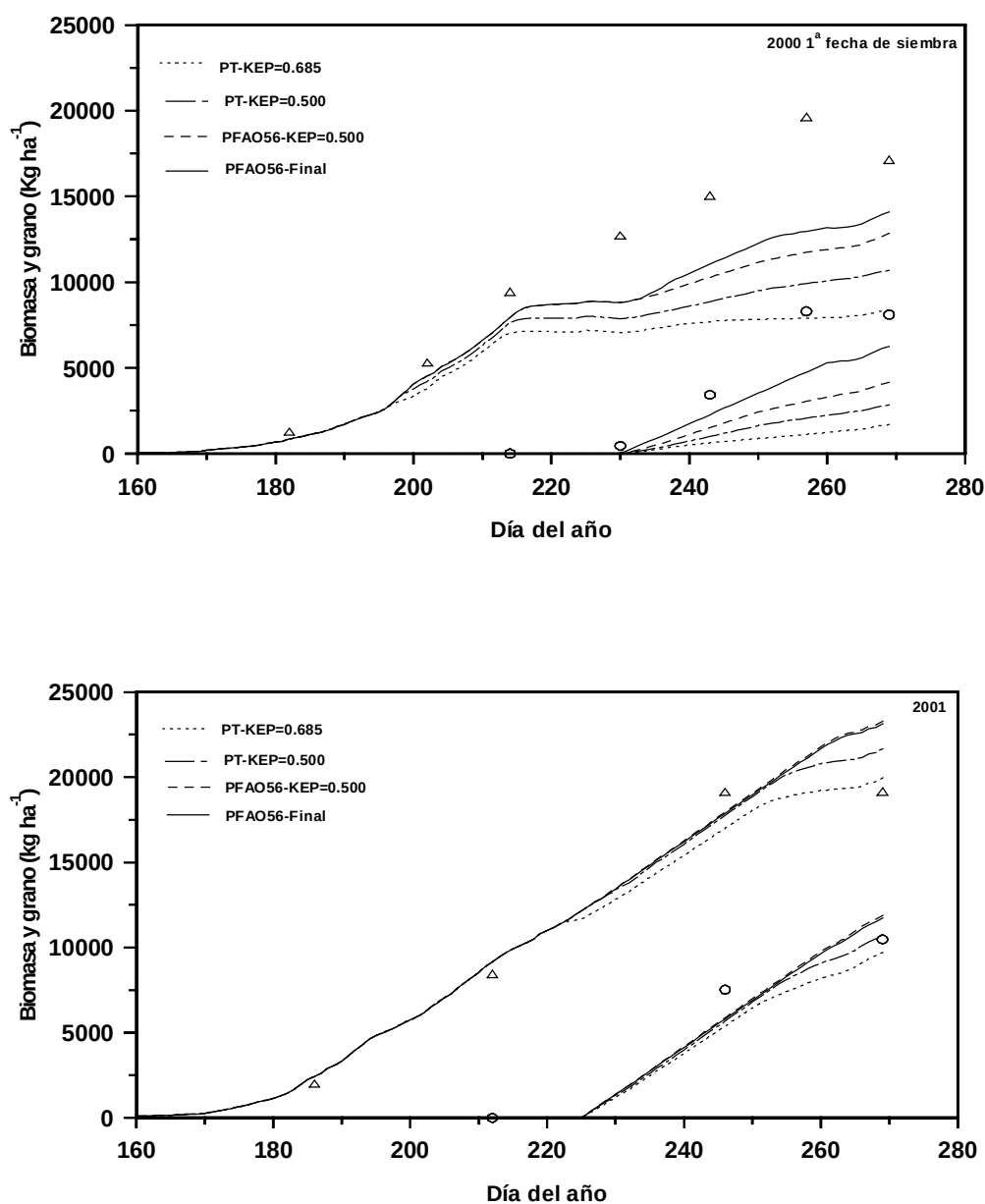


Fig. 13 (continuación). Evolución de las acumulaciones de biomasa aérea y de grano observadas (puntos) y simuladas (líneas) de cuatro tratamientos de secano (1998, 1999-1ª fecha, 2000-1ª fecha y 2001) obtenidas con diferentes opciones de ET y modificaciones del modelo CERES-4.0. 1.) Opción de ET de Priestley-Taylor con un coeficiente KEP para el reparto entre evaporación y transpiración de 0.685 (PT-KEP=0.685; opción por defecto del modelo); 2.) Opción de ET de Priestley-Taylor con un coeficiente KEP para el reparto entre evaporación y transpiración de 0.500 (PT-KEP=0.500); 3.) Opción de ET de Penman-Monteith FAO56 con un KEP=0.500 (PFAO56-KEP=0.500); 4.) Idéntico a (3) con la función de Edmeades para calcular el número de granos por planta y sin efecto directo del contenido de agua del suelo en el cálculo del número de granos por planta (PFAO56-Final). Cada punto (Δ , biomasa; $\circ$, rendimiento de grano) representa la media de cuatro repeticiones.

2.3.2.3. CARACTERÍSTICAS DEL SUELO, CONDICIONES HÍDRICAS INICIALES Y DINÁMICA DE EXTRACCIÓN DEL AGUA DEL SUELO

Como las principales características de retención de agua del suelo (LL, DUL) y sus condiciones hídricas iniciales fueron determinadas experimentalmente (**Tablas 18, 19 y 20**), no se puede considerar que las incertidumbres relacionadas con los datos de entrada del suelo o el agua disponible a principio de ciclo puedan ser responsables de la incapacidad del modelo para estimar correctamente la biomasa aérea y el rendimiento de grano. Además, la capacidad de retención de agua del suelo medida (DUL-LL) fue alta (entre 13.2 y 23.7 % vol.; **Tabla 18**) para un suelo de esta textura y el uso de una función de pedotransferencia habría asignado menores valores a cada uno de los horizontes del suelo. Finalmente, los gráficos temporales de contenido de agua del suelo del tratamiento de secano de 2001 (una estación de crecimiento del maíz relativamente lluviosa) (**Fig. 14**), mostraron que la opción de ET por defecto del modelo (PT) tendió generalmente a predecir demasiada extracción de agua en todos los horizontes del suelo situados a más de 15 cm de profundidad. Por otro lado, los datos medidos de contenido de agua del suelo de 2001, muestran que no se produjo extracción de agua por debajo de 1.20 m de profundidad y las observaciones visuales del perfil de enraizamiento realizadas al final de la estación de crecimiento de 2002, mostraron que fueron muy escasas las raíces que alcanzaron esta profundidad y que ninguna la superó. Por tanto, parece evidente que la opción PT de evapotranspiración sobreestimó la evapotranspiración real del cultivo, y en consecuencia fue responsable de que el modelo predijera generalmente un déficit hídrico demasiado precoz y severo, lo cual es la causa principal de las pobres estimaciones de biomasa y de rendimiento en grano de CERES-4.0 bajo condiciones de secano. Como Sau *et al.* (2004) mostraron, el modelo CROPGRO-Fababean con la opción de evapotranspiración PT (opción utilizada por defecto por el modelo) sobreestimó la evapotranspiración real de un cultivo de habas (*Vicia faba* L.) crecido en un entorno mediterráneo. Estos autores probaron otras opciones de cálculo de ET, que resultaron más adecuadas en aquel entorno. El interés por probar otras ecuaciones de ET para estimar la evapotranspiración del cultivo estuvo reforzado por el hecho de que otros trabajos de investigación realizados previamente

habían mostrado que los modelos CERES (con la opción PT) en diferentes entornos climáticos, solían sobreestimar la extracción de agua del suelo, especialmente durante la primera parte del ciclo (Jamieson *et al.*, 1998; Jara y Stockle, 1999; Eitzinger *et al.*, 2004).

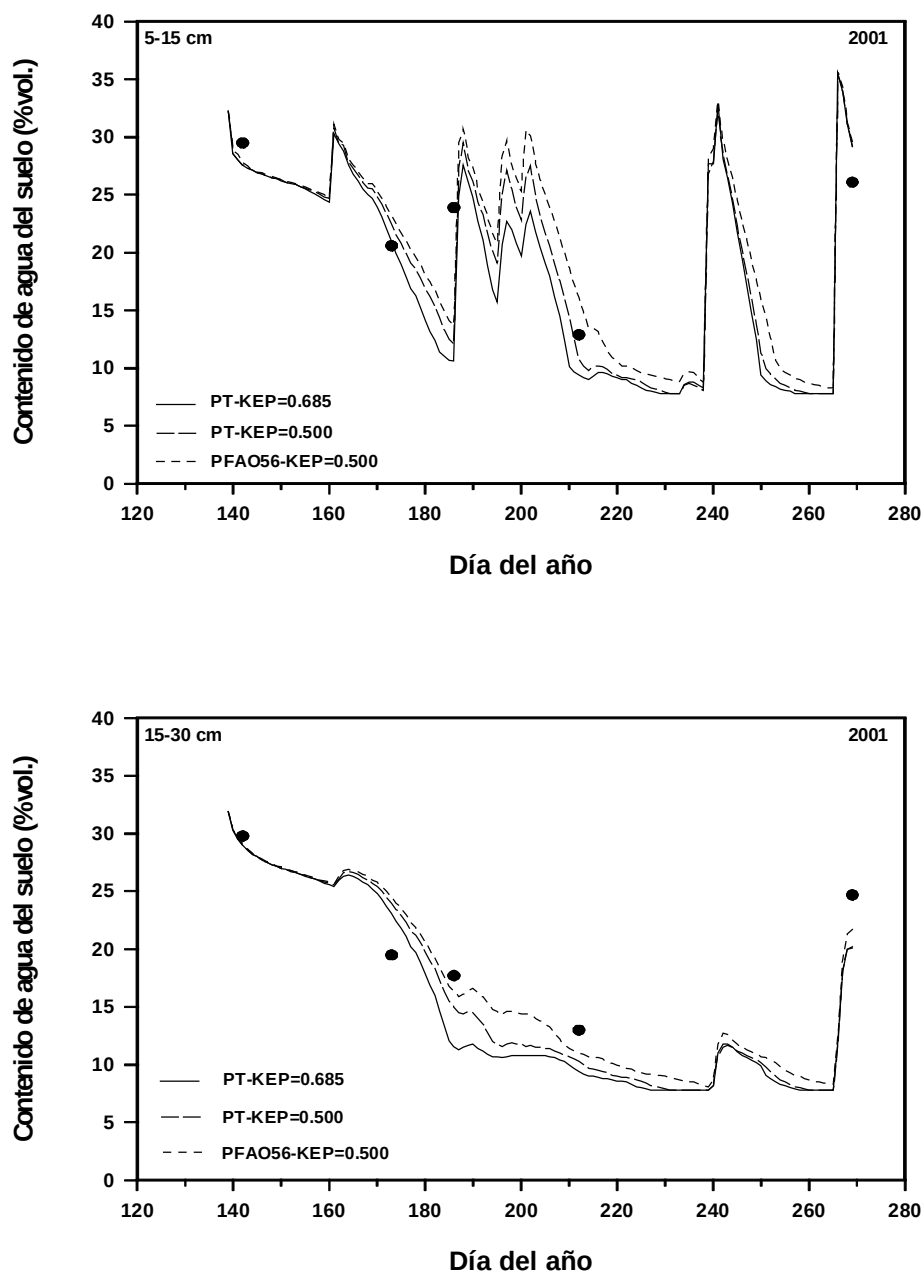


Fig. 14. Evolución del contenido de agua del suelo observada (puntos) y simulada (líneas) en los diferentes horizontes del suelo durante la estación de crecimiento del año 2001 en régimen de secano, utilizando diferentes opciones de ET y modificaciones del modelo CERES-4.0. 1.) Opción de ET de Priestley-Taylor con un coeficiente KEP para el reparto entre evaporación y transpiración de 0.685 (PT-KEP=0.685; opción por defecto del modelo); 2.) Opción de ET de Priestley-Taylor con un coeficiente KEP para el reparto entre evaporación y transpiración de 0.500 (PT-KEP=0.500); 3.) Opción de ET de Penman-Monteith FAO56 con un KEP=0.500 (PFAO56-KEP=0.500). Cada punto representa la media de tres repeticiones.

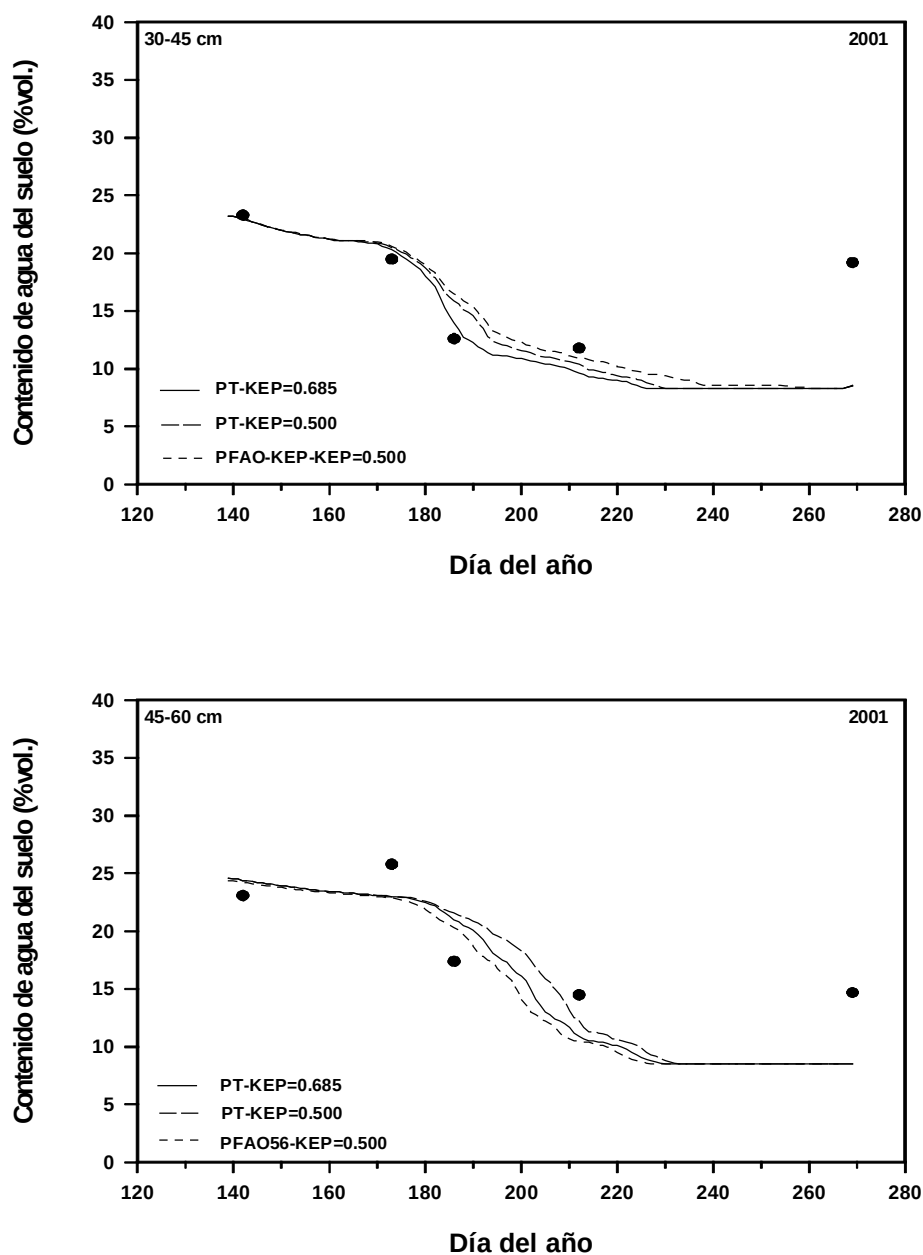


Fig. 14 (continuación). Evolución del contenido de agua del suelo observada (puntos) y simulada (líneas) en los diferentes horizontes del suelo durante la estación de crecimiento del año 2001 en régimen de secano, utilizando diferentes opciones de ET y modificaciones del modelo CERES-4.0. 1.) Opción de ET de Priestley-Taylor con un coeficiente KEP para el reparto entre evaporación y transpiración de 0.685 (PT-KEP=0.685; opción por defecto del modelo); 2.) Opción de ET de Priestley-Taylor con un coeficiente KEP para el reparto entre evaporación y transpiración de 0.500 (PT-KEP=0.500); 3.) Opción de ET de Penman-Monteith FAO56 con un KEP=0.500 (PFAO56-KEP=0.500). Cada punto representa la media de tres repeticiones.

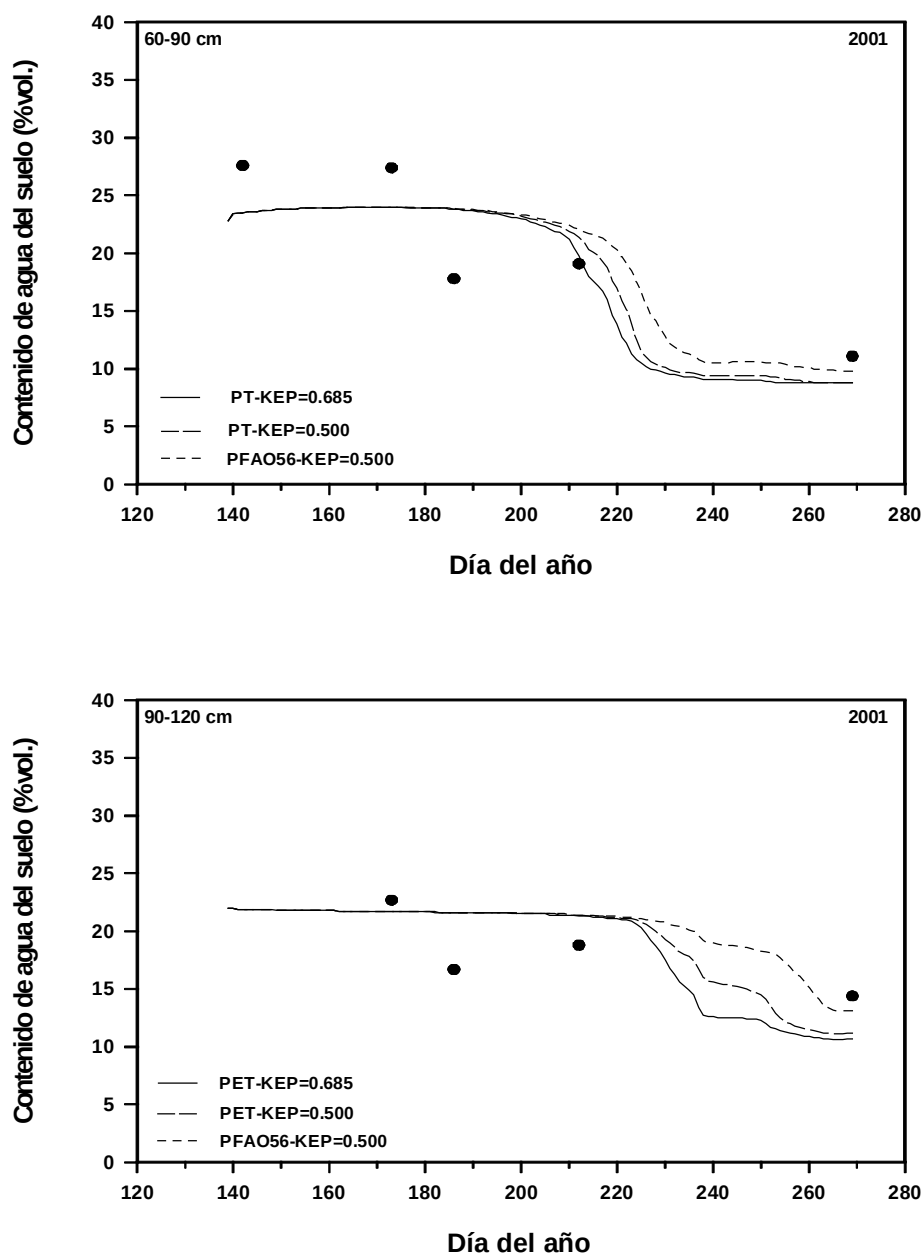


Fig. 14 (continuación). Evolución del contenido de agua del suelo observada (puntos) y simulada (líneas) en los diferentes horizontes del suelo durante la estación de crecimiento del año 2001 en régimen de secano, utilizando diferentes opciones de ET y modificaciones del modelo CERES-4.0. 1.) Opción de ET de Priestley-Taylor con un coeficiente KEP para el reparto entre evaporación y transpiración de 0.685 (PT-KEP=0.685; opción por defecto del modelo); 2.) Opción de ET de Priestley-Taylor con un coeficiente KEP para el reparto entre evaporación y transpiración de 0.500 (PT-KEP=0.500); 3.) Opción de ET de Penman-Monteith FAO56 con un KEP=0.500 (PFAO56-KEP=0.500). Cada punto representa la media de tres repeticiones.

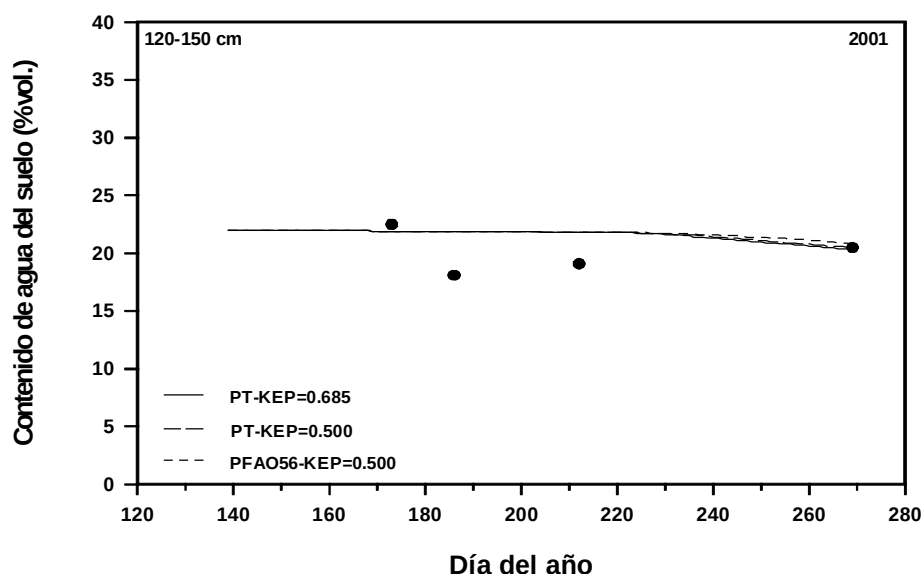


Fig. 14 (continuación). Evolución del contenido de agua del suelo observada (puntos) y simulada (líneas) en los diferentes horizontes del suelo durante la estación de crecimiento del año 2001 en régimen de secano, utilizando diferentes opciones de ET y modificaciones del modelo CERES-4.0. 1.) Opción de ET de Priestley-Taylor con un coeficiente KEP para el reparto entre evaporación y transpiración de 0.685 (PT-KEP=0.685; opción por defecto del modelo); 2.) Opción de ET de Priestley-Taylor con un coeficiente KEP para el reparto entre evaporación y transpiración de 0.500 (PT-KEP=0.500); 3.) Opción de ET de Penman-Monteith FAO56 con un KEP=0.500 (PFAO56-KEP=0.500). Cada punto representa la media de tres repeticiones.

2.3.2.4. EVALUACIÓN DE ECUACIONES ALTERNATIVAS PARA EL CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL

La ecuación de Penman-Monteith-FAO56 con un coeficiente de cultivo (K_c) de 1.00 está disponible en CERES-4.0, y fue una de las opciones de ET que propusieron Sau *et al.* (2004) para mejorar las estimaciones de biomasa aérea y de rendimiento de grano. Además es la ecuación que, en la actualidad, recomienda la FAO para calcular la evapotranspiración del cultivo de referencia (E_{To}). Manteniendo el coeficiente KEP que tiene por defecto el modelo (0.685), la opción PFAO56 permitió obtener mayores

predicciones de biomas, rendimiento de grano e índice de cosecha (IC) en los tratamientos de secano (**Tablas 24, 25 y 26**). La biomasa en cosecha, el rendimiento en grano y el IC medios estimados aumentaron desde 11426 hasta 13830 kg ha⁻¹, desde 4405 hasta 5759 kg ha⁻¹ y desde 0.360 hasta 0.392, respectivamente, en paralelo con una clara reducción de RMSE. Al mismo tiempo, esta opción aumentó el estadístico *d* hacia valores más cercanos a 1.00. En nuestro entorno, relativamente frío para el cultivo del maíz, la opción de ET PFAO56 predijo una menor E0 acumulada que PT. Las estimaciones medias de E0 acumuladas, calculadas con PT y PFAO56, a lo largo del ciclo para los siete tratamientos, fueron de 534.8 y 468.4 mm, respectivamente.

También se probó la opción de PFAO56 con un Kc de 1.10, empleando las ecuaciones propuestas por Sau *et al.* (2004) en las que Kc permite aumentar E0 desde un valor de ETo de 1.00 (Kc = 1.00) hasta 1.10*ETo (Kc = 1.1) a medida que el IAF se incrementa desde 0.00 hasta un máximo IAF de 6.00. En la actualidad, esta opción (PFAO56-Kc=1.10) no está disponible en CERES-4.0 y requiere una pequeña modificación del programa FORTRAN. Una vez incluida en el programa, proporcionó un mejor ajuste que PT para las estimaciones de biomasa, rendimiento de grano e IC pero peores estimaciones que PFAO56-Kc=1.00. Por tanto, a pesar de la recomendación de la FAO de utilizar valores de Kc superiores a 1.00 (Allen *et al.*, 1998), para las simulaciones aquí descritas y con la formulación presente, esta opción resulta ser demasiado estresante.

2.3.2.5. EVALUACIÓN DEL COEFICIENTE DE EXTINCIÓN QUE DIVIDE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL ENTRE EVAPORACIÓN POTENCIAL Y TRANSPIRACIÓN POTENCIAL

Teniendo en cuenta que Sau *et al.* (2004) mostraron que el ajuste de las simulaciones puede verse beneficiado por el uso de un KEP de 0.500, para repartir la evapotranspiración potencial entre EP0 y ES0, y que este cambio está apoyado por datos experimentales (Villalobos y Fereres, 1990) y por la teoría de la extinción de la

radiación (Goudriaan, 1977; Goudriaan y van Laar, 1994; Sau *et al.*, 2004), se probó de sustituir el KEP del modelo original (0.685) por 0.500.

Esta reducción de KEP mejoró las simulaciones realizadas en secano con las tres opciones de ET probadas (PT, PFAO56-Kc=1.00 y PFAO56-Kc=1.10) ya que permitieron aumentar de modo sistemático las estimaciones de biomasa, de rendimiento de grano y de IC, reducir RMSE e incrementar el coeficiente de ajuste *d* (**Tablas 24, 25 y 26**). Además, este cambio también permitió mejorar las predicciones de contenido de agua de los diferentes horizontes obtenidos con la opción PT sin modificar, mediante una reducción de las extracciones de agua del suelo a principio de ciclo (**Fig. 14**).

Estos resultados son consistentes con los descritos por Sau *et al.* (2004) para un cultivo de invierno en clima mediterráneo y también con los obtenidos en Nueva Zelanda por Jamieson *et al.* (1998). Estos dos trabajos muestran que los modelos de cultivo incluidos en el DSSAT, empleando la opción PT con sus coeficientes originales, tienden a sobreestimar las extracciones de agua bajo condiciones de secano, especialmente a principio de ciclo. Sau *et al.* (2004) atribuyeron este problema del modelo a la utilización de un KEP excesivo (1.00 en CERES-3.5, 0.85 en el CROPGRO incluido en el DSSAT V3.5) y a una posible sobreestimación de E0 por la opción PT en entornos relativamente fríos y con bajo déficit de presión de vapor (VPD).

Tres modelos de crecimiento del trigo, SIRIUS, SWHEAT y AFRCWHEAT2 (Jamieson *et al.*, 1998) utilizan un KEP de 0.45.

Todos estos ejemplos sugieren que el KEP utilizado por CERES-4.0 sigue siendo demasiado alto a pesar de haber sido reducido desde 1.00 en CERES-3.5 hasta 0.685 en CERES-4.0.

Cuando se corrieron las simulaciones de secano con CERES-4.0 modificado para que usara las ecuaciones de reparto de ET de CERES-3.5, todos los estadísticos correspondientes a las estimaciones de biomasa, rendimiento de grano e IC empeoraron. Las RMSE aumentaron desde 5027, 3728, 0.155 hasta 6378, 4263 y 0.161 para la biomasa en cosecha, el rendimiento de grano e IC, respectivamente.

2.3.2.6. EVALUACIÓN DE FUNCIONES ALTERNATIVAS PARA ESTIMAR EL CRECIMIENTO DIARIO DE LOS GRANOS Y EL NÚMERO DE GRANOS POR PLANTA

La opción PFAO56 con $KEP = 0.500$ permitió obtener una estimación correcta de la biomasa aérea media en cosecha de los tratamientos de secano (15780 kg ha^{-1} simulados *versus* 15654 medidos) pero las simulaciones siguieron dando valores de rendimiento de grano demasiado bajos (6821 kg ha^{-1} simulados *versus* 7728 medidos). Esto es debido a un número estimado de granos por metro cuadrado demasiado pequeño ($3370 \text{ granos m}^{-2}$ simulados *versus* 3900 medidos). La incapacidad del modelo para predecir correctamente el efecto del déficit hídrico sobre el número de granos (**Tabla 27**), nos llevó a reevaluar las funciones del modelo que lo calculan. La revisión bibliográfica llevada a cabo mostró que en general, a pesar de obtener con CERES-Maize buenas estimaciones del rendimiento de grano, las predicciones del número de granos por planta (GPP) eran menos acertadas. En el modelo actual se emplea, para estimar GPP, la función expuesta a continuación:

$$GPP = G2 * PSKER/7200.0 + 50.0 \quad [18]$$

Esta ecuación fue establecida a partir de datos experimentales obtenidos en Kenia por Keating y Wafula (datos no publicados; K. J. Boote comunicación personal). Se trata de una función lineal de la media de la fotosíntesis durante el estadio 4 (PSKER), que fija un número mínimo de cincuenta granos por planta. Por otro lado, en el modelo original de CERES-Maize (Jones y Kiniry, 1986), la función de cálculo de GPP era la que propusieron Edmeades y Daynard (1979):

$$GPP = G2 * (PSKER - 195)/(1213.2 + (PPSKER - 195)) \quad [27]$$

En la Eq. [27], se necesita una tasa mínima de fotosíntesis durante el estadio 4 de $195 \text{ mg pl}^{-1} \text{ d}^{-1}$ para que la planta empiece a fijar granos. La comparación de las dos ecuaciones, después de haber sido calibradas con los datos de los tratamientos regados, mostró que, factores ambientales que reducen PSKER como SWFAC tenían un efecto mucho más reductor en la Eq. [18] que en la Eq. de Edmeades (Eq. [27]; **Fig. 15**).

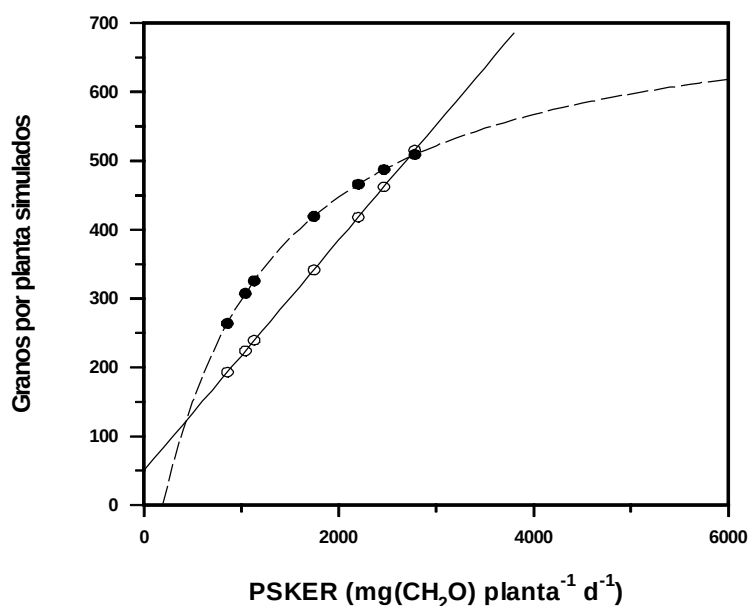


Fig. 15. GPP (número de granos por planta simulado) *versus* PSKER (fotosíntesis media diaria desde antesis hasta principio de llenado efectivo del grano ($\text{mg (CH}_2\text{O) pl}^{-1} \text{ d}^{-1}$)) calculado con la funciones siguientes: 1.) la actualmente presente en CERES-4.0 para calcular el número de granos por planta (línea continua); 2.) la de Edmeades (línea discontinua). Los símbolos abiertos y cerrados representan los GPP simulados para los tratamientos de secano con la ecuación actual (1) y la de Edmeades (2) respectivamente ((1) Opción de ET de Penman-Monteith FAO56 ET con un $\text{KEP}=0.500$ (PFAO56- $\text{KEP}=0.500$); (2) Idéntico a (1) pero con la ecuación de Edmeades para calcular GPP).

De este modo, se sustituyó la ecuación de cálculo de GPP originalmente incluida en CERES-4.0 por la Eq. [27], y se siguió corriendo el modelo con la opción PFAO56- $\text{KEP}=0.500$. El cambio de esta ecuación hizo necesario que se volviera a calibrar el coeficiente genético G2 para los tratamientos regados. Después de esta nueva calibración, G2 quedó fijado en 748 granos potenciales por planta en vez de 1205. Las medias observadas y simuladas (7 tratamientos regados) de peso de un grano y número de granos por unidad de superficie en cosecha fueron respectivamente: 231 y 231 mg grano^{-1} ($\text{RMSE} = 24$); 4847 y 4853 número de granos m^{-2} ($\text{RMSE} = 299$). Por su parte, las medias observadas y simuladas (7 tratamientos regados) de biomasa y de rendimiento en grano en cosecha fueron respectivamente: 22228 y 22126 kg ha^{-1} ($\text{RMSE} = 2020$); 11138 y 11227 kg ha^{-1} ($\text{RMSE} = 1227$). En condiciones de secano la ecuación de Edmeades incrementa las medias simuladas de biomasa aérea en cosecha,

rendimiento de grano, y especialmente n° de granos por metro cuadrado y disminuye RMSE (**Tabla 28** y **Fig. 15**). La mejora fue especialmente sensible en el rendimiento medio de grano estimado que aumentó en secano desde 6821 kg ha⁻¹ (RMSE = 2110) hasta 7397 (RMSE = 1530) debido al mayor número medio de granos por metro cuadrado simulado.

Algunos investigadores han sugerido que el crecimiento de los granos es menos sensible a bajos potenciales hídricos de la planta (SWFAC) que la planta entera. Esto sería debido a que la conexión hidráulica del xilema, desde los embriones o el endospermo, se bloquea en el pedicelo de las semillas de cereal o en la envoltura de las semillas en las leguminosas (Fisher, 2000). Además, el efecto de SWFAC ya es tenido en cuenta por el modelo en la reducción de la producción fotosintética diaria (CARBO). Por tanto, se eliminó el efecto de SWFAC sobre GROGRN (Eq. [19]) y se mantuvo la ecuación de Edmeades para GPP (PFAO56-Final). Esto permitió aumentar el peso medio simulado de los granos de los tratamientos de secano desde 186 hasta 191 mg y reducir el RMSE para esta variable desde 24 hasta 20. El ajuste a la línea 1:1 es ahora prácticamente correcto para la biomasa aérea en cosecha y el rendimiento en grano (**Fig. 12**, PFAO56-Final) y es mucho mejor que el conseguido con PT-KEP=0.685, para el número de granos por metro cuadrado (**Fig. 15**).

Tabla 28. Biomasa total aérea en cosecha, rendimiento de grano, peso de un grano y número de granos por metro cuadrado medio, medido y simulado de los tratamientos de secano con diferentes opciones de ET y modificaciones de CERES-4.0

Variable	Medido	PFAO56 ^a KEP=0.500	PFAO56 ^b KEP=0.500 Edmeades	PFAO56 ^c KEP=0.500 Edmeades y sin SWFAC en GROGRN
Biomasa (kg ha⁻¹)	15654	15780	16079	16126
RMSE		3072	2781	2713
<i>d</i>		0.796	0.823	0.829
RMSE de la dif.		3303	3074	2984
<i>d</i> de la dif.		0.739	0.760	0.772
Rto grano (kg ha⁻¹)	7728	6821	7397	7577
RMSE		2110	1530	1389
<i>d</i>		0.804	0.875	0.893
RMSE de la dif.		2322	1867	1755
<i>d</i> de la dif.		0.750	0.796	0.812
Peso grano (mg)	201	196	186	191
RMSE		19	24	20
<i>d</i>		0.778	0.788	0.843
RMSE de la dif.		15	29	27
<i>d</i> de la dif.		0.829	0.648	0.633
n° granos m⁻²	3900	3370	3905	3905
RMSE		1037	723	723
<i>d</i>		0.699	0.802	0.802
RMSE de la dif.		1140	784	784
<i>d</i> de la dif.		0.594	0.714	0.714

^a Ecuación de evapotranspiración de Penman-Monteith FAO56 con un coeficiente de cultivo (Kc) igual a 1.00 y un KEP igual a 0.500

^b Idéntico a (a) con la ecuación de Edmeades para calcular el número de granos por planta

^c Idéntico a (b) sin efecto directo del factor de agua del suelo (SWFAC) sobre el crecimiento del granos (PFAO56-Final).

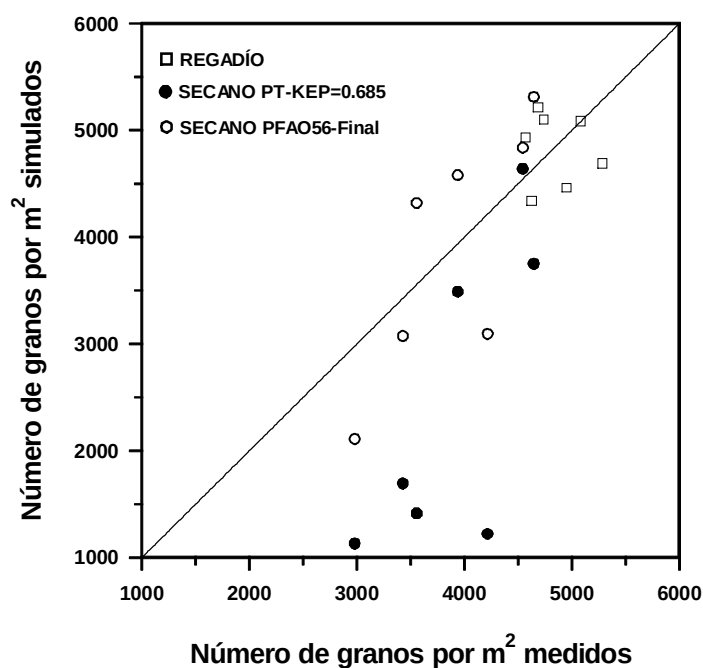


Fig. 16. Valores simulados y medidos del número de granos por metro cuadrado de los tratamiento de secano y de regadío utilizando diferentes opciones de ET y modificaciones del modelo CERES- 4.0. 1.) Opción de ET de Priestley-Taylor con un coeficiente KEP para el reparto entre evaporación y transpiración de 0.685 (PT-KEP=0.685; opción por defecto del modelo); 2.) Opción de ET de Penman-Monteith FAO56 con un KEP=0.500, con la función de Edmeades para calcular el número de granos por planta, y sin efecto directo del contenido de agua del suelo en el cálculo del número de granos por planta (PFAO56-Final). Cada punto representa la media de cuatro repeticiones.

2.3.2.7. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE POSIBLES CAMBIOS EN LAS FUNCIONES DE ENRAIZAMIENTO

Con los ajustes propuestos, las simulaciones de biomasa aérea media en cosecha y de rendimiento de grano de los tratamientos de secano fueron bastante satisfactorias (ver PFAO56-Final en **Tabla 29**). Sin embargo éstas siguieron siendo claramente demasiado bajas en 2002, la estación de crecimiento más fría durante el período vegetativo del cultivo y una de las más frías durante el período reproductivo (ver **Tabla 23**). Debido a las bajas temperaturas registradas este año, el modelo (PFAO56-Final) estimó una profundidad de enraizamiento máxima de aprox. 0.80 m, mientras que en los demás años experimentales, varió entre aprox. 1.00 m en 1998-1ª fecha, 1999-1ª fecha y 2000, y 1.20 m en 2001 (**Fig. 17**). Las observaciones visuales del sistema radicular del cultivo realizadas al final de la estación de crecimiento de 2002 en el tratamiento de secano, mostraron que la profundidad máxima alcanzada por unas pocas raíces fue de aprox. 1.15-1.20 m. Por tanto, el modelo infraestimó la profundidad alcanzada por el sistema radicular en esta particular estación de crecimiento y en consecuencia estimó una fecha de inicio del déficit hídrico demasiado temprana, además de un déficit hídrico demasiado severo. Como los datos del sistema radicular de los cultivos escasean en la literatura científica, las funciones de enraizamiento de los modelos de cultivo han sido generalmente poco contrastadas, y constituyen uno de los aspectos más débiles de la mayor parte de ellos.

Con el objetivo de mejorar el ajuste del modelo para los diferentes regímenes de lluvia registrados durante los años experimentales, se probaron cuatro modificaciones de las funciones de enraizamiento originales de CERES-4.0 y se compararon sus resultados con las salidas de PFAO56-Final sin modificaciones:

1. Sin efecto de SWFAC sobre la profundidad de enraizamiento (RTDEP): se elimina el efecto del factor de estrés hídrico en la fotosíntesis sobre la tasa de alargamiento de las raíces. Se calcula RTDEP con la Eq. [28] en vez de las Eqs. [20] y [21].

$$RTDEP = RTDEP + DTT * A * \text{SQRT}(\text{SRGF}(L) * \text{SWDF}) \quad [28]$$

SRGF(L) es el factor de distribución relativa de longitud de raíces en el horizonte L; A=0.1 si CUMDTT ≤ 275 °Cd y A = 0.2 si CUMDTT > 275 °Cd (lo mismo para las cuatro modificaciones)

2. SWFAC acelera RTDEP del mismo modo que en los modelos CROPGRO.

$$RTDEP = RTDEP + DTT * A * \text{SQRT}(\text{SRGF}(L) * \text{SWDF}) * (1 + 0.25 * (1 - \text{MAX}(\text{SWFAC}, 0.40))) \quad [29]$$

3. Sin efecto de SRGF(L) sobre RTDEP

$$RTDEP = RTDEP + DTT * A * \text{MIN}(\text{SWFAC} * 2.0, \text{SWDF}) \quad [30]$$

4. Efecto reducido de SRGF(L) sobre RTDEP

$$RTDEP = RTDEP + DTT * A * (\text{SRGF}(L) * (\text{MIN}(\text{SWFAC} * 2.0, \text{SWDF}))^{**2})^{** (1/3)} \quad [31]$$

(1) Sin efecto de SWFAC sobre RTDEP: considerando “RMSE de la dif.” y “d de la dif.” las estimaciones de rendimiento de grano, peso medio del grano y de nº de granos por metro cuadrado mejoraron ligeramente en comparación con PFAO56-Final (**Tabla 29**), mientras las predicciones de biomasa apenas se vieron afectadas. Por tanto, esta modificación se puede considerar como globalmente positiva.

(2) SWFAC acelera RTDEP del mismo modo que en los modelos CROPGRO: esta modificación sólo mejoró el ajuste del nº de granos por metro cuadrado (**Tabla 29**) pero fue negativa para las tres otras variables, por lo que no se puede considerar como positiva.

(3) Sin efecto de SRGF(L) sobre RTDEP: esta modificación sólo permitió mejorar el ajuste del peso de un grano (**Tabla 29**) pero fue negativo para las otras 3 variables. Por tanto no puede ser considerada como positiva. Este cambio aceleró la tasa de elongación de raíces de modo muy significativo (**Fig. 18**). Mientras PFAO56-Final predijo una profundidad máxima de enraizamiento de aprox. 0.80 m que se alcanzó unos 90 días después de la siembra, esta modificación del modelo estimó una profundidad máxima de 1.50 m (ya que el

perfil del suelo está limitado a esta profundidad) que se alcanzó, aproximadamente, 10 días más tarde. Además, este rápido avance del frente radicular acentuó la tendencia del modelo a sobreestimar las extracciones de agua de los horizontes profundos. (**Fig. 19**). En consecuencia, esta modificación del modelo no es positiva ya que incrementó en exceso la profundidad del frente radicular. En realidad, las primeras versiones de CERES-Maize (Jones y Kiniry, 1986) no consideraban que SRGF(L) tuviera efecto alguno sobre RTDEP. Esta característica fue incorporada al modelo en 1994 apoyándose en datos experimentales tomados en Argentina por Julio Dardenelli (datos sin publicar; K. J. Boote comunicación personal). Nuestro trabajo muestra que el modelo necesita reducir la progresión de las raíces hacia los horizontes profundos de un modo similar al llevado a cabo con SRGF(L) en CERES-4.0. Sin embargo, al plantear la hipótesis de que el efecto de SRGF(L) sobre la extensión de las raíces era demasiado restrictivo, se probó a reducir su efecto.

(4) Efecto reducido de SRGF(L) sobre RTDEP: esta modificación fue negativa para las cuatro variables estudiadas (**Tabla 29**).

De este análisis de sensibilidad, se puede deducir que ninguna de las cuatro modificaciones de las funciones de enraizamiento probadas pudo considerarse que mejoraba de modo notorio el ajuste global con la base de datos utilizada. Además, debemos recordar que todos los modelos del DSSAT-4.0 utilizan la temperatura del aire en vez de la temperatura del suelo para influenciar las funciones de enraizamiento. Como la temperatura de los horizontes profundos oscila menos que la temperatura del aire, se puede esperar que la profundidad máxima de enraizamiento simulada en 2002, el año más frío, hubiera aumentado, y por tanto mejorado las simulaciones, de haberse utilizado la temperatura de suelo en vez de la del aire. En consecuencia, proponemos que si se incluye un estimador de temperatura de los diferentes horizontes del suelo fiable en el modelo, las futuras versiones del DSSAT deberían utilizar la temperatura simulada del suelo como variable conductora en el cálculo de la tasa de elongación de raíces.

Tabla 29. Biomasa total aérea en cosecha, rendimiento de grano, peso de un grano y número de granos por metro cuadrado medio, medido y simulado de los tratamientos de secano con diferentes opciones de CERES-4.0

Variable	Medido	PFAO56-Final ^a	PFAO56-Final ^b sin SWFAC en RTDEP	PFAO56-Final ^c SWFAC acelera RTDEP	PFAO56-Final ^d sin SRGF en RTDEP	PFAO56-Final ^e efecto reducido de SRGF sobre RTDEP
Biomasa (kg ha⁻¹)	15654	16126	16166	16292	20525	17948
RMSE		2713	2739	2812	5143	3213
<i>d</i>		0.829	0.827	0.819	0.450	0.704
RMSE de la dif.		2984	3006	3073	5638	3483
<i>d</i> de la dif.		0.772	0.771	0.765	0.493	0.697
Rto. grano (kg ha⁻¹)	7728	7577	7614	7624	10101	8536
RMSE		1389	1410	1486	2702	1737
<i>d</i>		0.893	0.890	0.880	0.566	0.799
RMSE de la dif.		1755	1762	1820	2897	1812
<i>d</i> de la dif.		0.812	0.813	0.806	0.592	0.790
Peso un grano (mg)	201	191	192	191	208	193
RMSE		20	19	22	32	47
<i>d</i>		0.843	0.846	0.813	0.519	0.340
RMSE de la dif.		27	27	27	26	36
<i>d</i> de la dif.		0.633	0.638	0.659	0.714	0.649
Nº de granos m⁻²	3900	3905	3907	3928	4871	4469
RMSE		723	723	703	1053	769
<i>d</i>		0.802	0.803	0.812	0.528	0.753
RMSE de la dif.		784	782	755	1117	754
<i>d</i> de la dif.						

^a Ecuación de evapotranspiración de Penman-Monteith FAO56 con un coeficiente de cultivo (Kc) igual a 1.00 y un KEP igual a 0.500, ecuación de Edmeades para calcular el número de granos por planta y sin efecto directo del factor de agua del suelo (SWFAC) sobre el crecimiento del grano

^b Idéntico a (a) sin efecto reductor de SWFAC sobre la tasa de elongación de las raíces

^c Idéntico a (a) con efecto estimulante de SWFAC sobre la tasa de elongación de las raíces (aproximación similar a la del modelo CROPGRO)

^d Idéntico a (a) sin efecto de SRGF(L) sobre la tasa de elongación de las raíces

^e Idéntico a (a) con un efecto reducido de SRGF(L) sobre la tasa de elongación de las raíces.

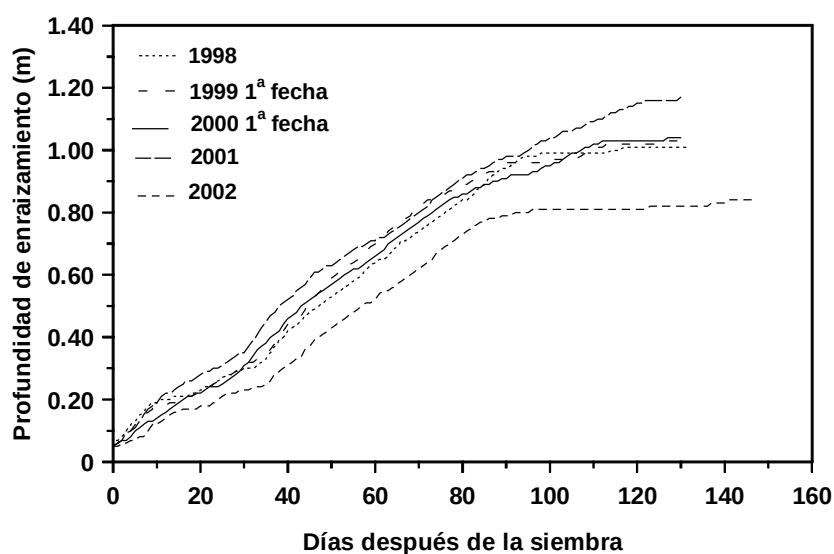


Fig. 17. Dinámica del avance del frente radical simulado (líneas) en los tratamientos de secano de 1998, 1999-1ª fecha, 2000-1ª fecha, 2001 y 2002, utilizando una modificación del modelo CERES-4.0 (PFAO56-Final: Opción de ET de Penman-Monteith FAO56 con un $KEP=0.500$, con la función de Edmeades para calcular el número de granos por planta, y sin efecto directo del contenido de agua del suelo en el cálculo del número de granos por planta).

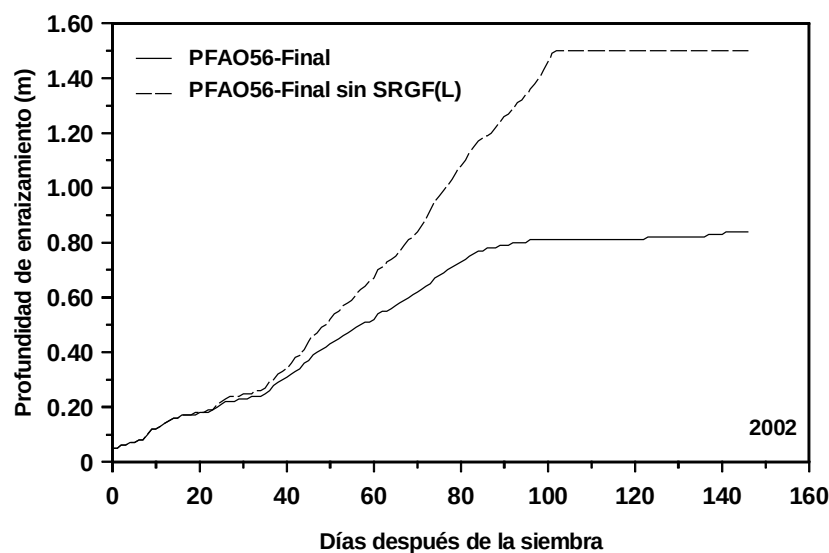


Fig. 18. Dinámica del avance del frente radical simulado (líneas) en el tratamientos de secano de 2002 utilizando dos modificaciones del modelo CERES-4.0: 1.) PFAO56-Final (opción de ET de Penman-Monteith FAO56 con un $KEP=0.500$, con la función de Edmeades para calcular el número de granos por planta, y sin efecto directo del contenido de agua del suelo en el cálculo del número de granos por planta); 2.) PFAO56-Final sin SRGF(L): Idéntico a (1) pero sin efecto de SRGF(L) sobre la tasa de elongación radical.

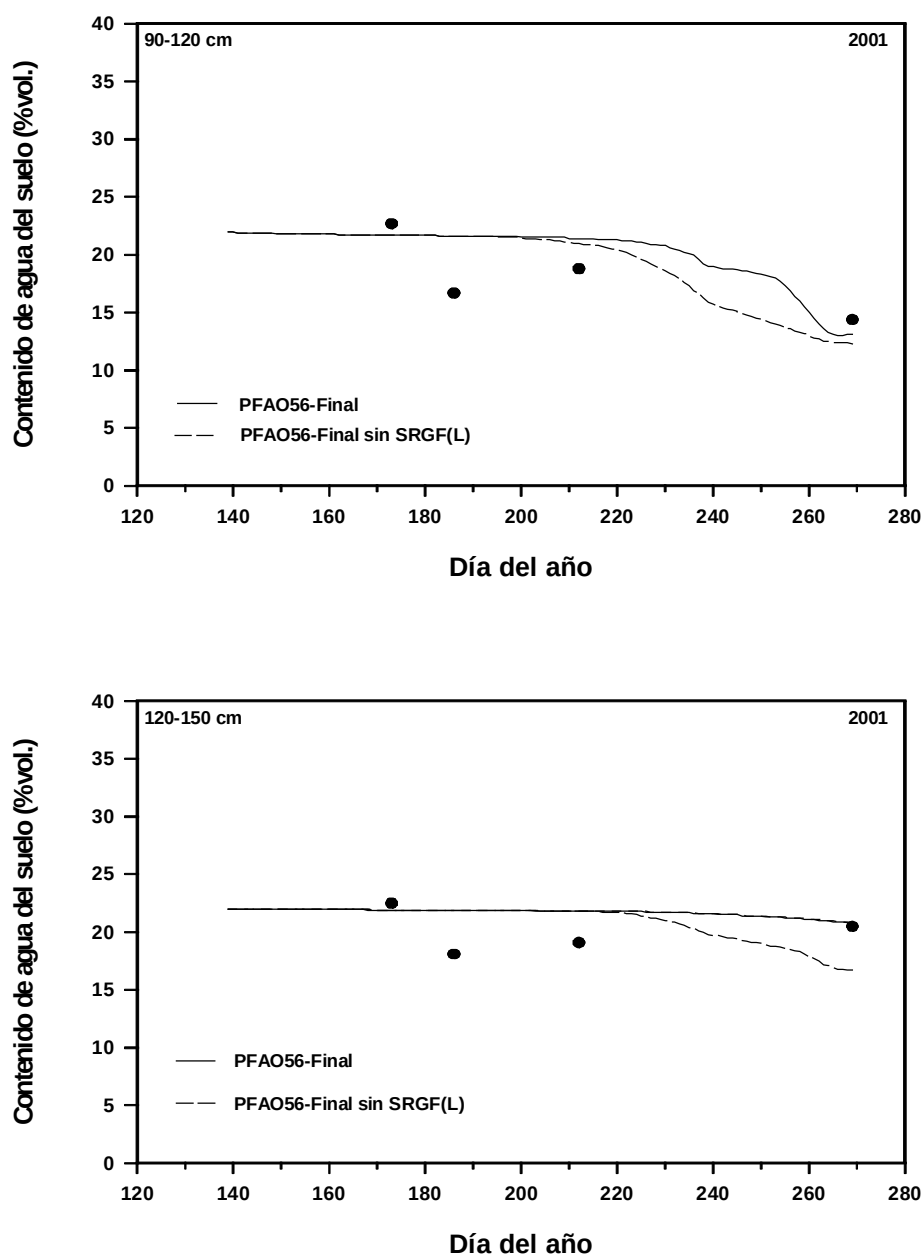


Fig. 19. Evolución del contenido de agua observado (puntos) y simulado (líneas) en los dos horizontes del suelo más profundos durante la estación de crecimiento de 2001 en régimen de secano, utilizando dos modificaciones del modelo CERES-4.0: 1.) PFAO56-Final (opción de ET de Penman-Monteith FAO56 con un $KEP=0.500$, con la función de Edmeades para calcular el número de granos por planta, y sin efecto directo del contenido de agua del suelo en el cálculo del número de granos por planta); 2.) PFAO56-Final sin SRGF(L): Idéntico a (1) pero sin efecto de SRGF(L) sobre la tasa de elongación radicular. Cada punto representa la media de tres repeticiones.

2.4. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO SEGUNDO

2.4.1. CONCLUSIONES DE LA EVALUACIÓN DE TRES VERSIONES DEL MODELO CERES-MAIZE BAJO CONDICIONES NO LIMITANTES DEL MEDIO

1. En el entorno estudiado, las simulaciones realizadas con CERES-4.0 fueron mejores que las de CERES-3.5 o CERES-2003. Con esta versión se obtienen las mejores predicciones de las variables estudiadas (biomasa total aérea, rendimiento de grano e índice de área foliar (IAF)). Los peores resultados se obtuvieron con CERES-2003.
2. Las diferentes versiones de CERES-Maize tienden a infraestimar el IAF y a simular una senescencia demasiado rápida del IAF, lo que provoca una reducción de las estimaciones de biomasa y de grano.
3. Con CERES 2003 se obtienen los peores resultados debido principalmente a que en el período de llenado del grano, el 64 % de la materia seca translocada de los tallos al grano se pierde. Esto no ocurre con las otras versiones, en las que la removilización se produce con una eficiencia uno a uno.
4. Las razones por las que CERES-4.0 obtiene los mejores resultados están relacionadas con las nuevas funciones de temperatura que afectan a la eficiencia en el uso de la radiación (PRFT) y a la tasa de llenado del grano (RGFILL), que en la versión-4.0 son menos sensibles a la temperatura.
5. La calidad de los ajustes obtenidos con CERES-4.0 mejoraría si sus funciones de acumulación de biomasa y de grano fueran ligeramente más sensibles a la temperatura. Para alcanzar este objetivo, las funciones de temperatura propuestas por Wilson *et al.* (1995) parecen dar buenos resultados. No obstante, para confirmar esta hipótesis sería conveniente probar CERES-Maize con estas funciones de temperatura en un mayor número de entornos que cubrieran un amplio rango de temperaturas.

2.4.2. CONCLUSIONES DE LA EVALUACIÓN DEL MODELO CERES-MAIZE V-4.0 EN CONDICIONES DE SECANO

1. En el entorno experimental en condiciones de secano, las predicciones de biomasa en cosecha y de rendimiento de grano obtenidas con las opciones de ET probadas (PT y PFAO56), se beneficiarían del uso de un coeficiente de extinción de la energía (KEP) de 0.500 en vez de 0.685.
2. La opción PFAO56 es la que menos agua demanda de las dos ecuaciones de ETo probadas. Con ella se obtienen las mejores predicciones de las variables estudiadas (biomasa total aérea, rendimiento de grano, índice de cosecha y número de granos por metro cuadrado).
3. La simulación de la respuesta al déficit hídrico del número de granos por planta por el modelo CERES-4.0 (sin modificar) fue bastante pobre. Sin embargo las salidas del modelo pudieron ser mejoradas mediante el uso de la función propuesta por Edmeades y Daynard (1979) que en realidad era la función utilizada por la primera versión de CERES-Maize (Jones y Kiniry, 1986).
4. Las predicciones del modelo mejoraron también al eliminar el efecto directo del factor de estrés hídrico que afecta a la fotosíntesis (SWFAC) sobre la función que calcula la tasa de crecimiento del grano.
5. El análisis de sensibilidad de las funciones de alargamiento de las raíces confirmó que es preciso probar esta parte del modelo en el mayor número de entornos posibles y que no es deseable que la tasa de elongación de raíces se vea frenada por el déficit hídrico del cultivo.
6. Si se incluye un estimador de temperatura de los diferentes horizontes del suelo fiable en el modelo, las futuras versiones del DSSAT deberían utilizar la temperatura simulada del suelo como variable conductora en el cálculo de la tasa de elongación de raíces.

BIBLIOGRAFÍA

- AEAC.SV. 2000. Situación actual de la agricultura de conservación. *Agricultura de Conservación*, 12: 6-7 .
- AEAC.SV. 2002. *La agricultura de conservación en el mundo*. Asociación Española Agricultura de Conservación Suelos Vivos. <<http://www.aeacsv.org/html/agricultura.html>>.
- ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D. y SMITH. M. 1998. *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and drainage paper nº 56. FAO, Roma.
- AMIAMA ARES, C. 2003. *Siembra sin laboreo de raigrás italiano. Influencia de la naturaleza y estado del rastrojo del cultivo precedente y comparación con el laboreo convencional de propiedades físicas del suelo, respuesta del cultivo y aspectos económicos*. Tesis doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- ANDRADE, F. H., UHART, S. A. y CIRILO, A. 1993. Temperature affects radiation use efficiency in maize. *Field Crop Res.*, 32: 17-25.
- BAEZ, D., ESTAVILLO, J. M., RODRÍGUEZ, M., PINTO M., BESGA, G. y MERINO, P. 2000. Pérdidas de nitrógeno por lixiviación en alternativas forrajeras intensivas. *III Reunión Ibérica de Pastos y Forrajes*: 229-234.
- BALZA, R., CRUZADO, P. y LUQUIN, J. 1994. Resiembra directa de praderas sin laboreo previa aplicación de herbicida total. *Actas de la XXXIV Reunión Científica de la Sociedad Española para el Estudio de los Pastos*: 469-472.
- BANKS, J. y CARSON, J. S. 1984. *Discrete-event system simulation*. Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs, Nueva Jersey.
- BARBEYTO, F. 1997: *Explotacións de vacún de leite en Galicia. Manexo técnico e datos económicos. Ano 1996*. Xunta de Galicia.
- BARNHART S. L., SHRADER W. D. y WEBB J. R. 1978. Comparison of soil properties under continuous corn grain and silage cropping systems. *Agron. J.*, 70: 835-837.
- BEN NOUNA, B., KATERJI, N. y MASTRORILLI, M. 2003. Using the CERES-Maize model in a semi-arid Mediterranean environment. New modeling of leaf area and water stress functions. *Eur. J. Agron.*, 19: 115-123.
- BLEVINS, R. L., COOK, D., PHILLIPS, S. H., y PHILLIPS, R. E. 1971. Influence of

- no-tillage on soil moisture. *Agron. J.*, 63: 593-596.
- BONNET, O. T. 1966. *Inflorescences of maize, wheat, rye, barley and oats: their initiation and development*. Univ. of Illinois College of Agriculture. Agricultural Experimental Station, Bulletin, 721.
- BOOTE, K. J., JONES, J. W., HOOGENBOOM, G. y WILKERSON, G. G. 1997. Evaluation of the CROPGRO-soybean model over a wide range of experiments. En: *System approaches for sustainable agricultural development: applications of system approaches at the field level*. (Eds. M. J. Kropff et al.). Kluwer Academic Publishers. Dordrecht: 113-133.
- BORDEGARAY, M., RODRÍGUEZ, M., CRUZADO, P., MANGADO, J., MARTÍNEZ, A., ZARRAVEITIA, J. V. y PIÑEIRO, J. 1996. Siembra directa en las rotaciones forrajeras de raigrás italiano-maíz en la cornisa cantábrica. *Actas de la XXXVI Reunión Científica de la Sociedad Española para el Estudio de los Pastos*: 273-278.
- BRANDI-DOHRN, F. M., DICK, R. P., HESS, M., KAUFFMAN, S. M., HEMPHILL, D. D. y SELKER, J. S. 1997. Nitrate leaching under a cereal rye cover crops. *J. Environ. Qual.*, 26: 181-188.
- BROWN, R.H. y WILSON, J.R. 1983. Nitrogen response of Panicum species differing in CO₂ fixation pathways. II CO₂ exchange characteristics. *Crop Sci.*, 23: 1154-1159.
- BUENO LEMA, J. 1997. *Siembra sin laboreo de maíz forrajero en condiciones húmedas*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- CAMPBELL, G. S. y STOCKLE, C. O. 1994. *Principles and applications of cropping systems simulation modeling*. Manual del Curso de Postgrado. Universidad de Lleida.
- CANNELL, R. Q. y HAWES, J. D. 1994. Trends in tillage practices in relation to sustainable crop production with especial reference to temperate climates. *Soil Till. Res.*, 30: 245-282.
- CARBERRY, P. S., MUCHOW, R. C. y MC COWN, R. L. 1989. Testing the CERES-maize model in a semi-arid tropical environment. *Field Crop Res.*, 20: 297-315.
- CASTRIGNANO, A., KATERJI, N., KARAM, F., MASTRORILLI, M. y HAMDY, A. 1998. A modified version of CERES-Maize model for predicting crop response to salinity stress. *Ecol. Model.*, 111: 107-120.
- CASTRO, M. P., FLORES, G., GONZÁLEZ-ARRÁEZ, A., CASTRO, J. y PIÑEIRO, J. 2000. Efecto de la proporción de la leguminosa en la mezcla avena y veza común

y del tipo de aditivo empleado sobre la calidad fermentativa y composición químico bromatológica del ensilado. *III Reunión Ibérica de Pastos y Forrajes*: 615-620.

CHARLES-EDWARDS D.A. y THORNLEY J.H. 1974. Mathematical models and crop science. *Span*, 17: 57-59.

COELHO, D. T. y DALE, R. F. 1980. An energy-crop growth variable and temperature function for predicting corn growth and development: Planting to silking. *Agron. J.*, 72: 503-510.

COLIGADO, M. C. y BROWN, D. M. 1975. A bio-photo-thermal model to predict tassel initiation time in corn (*Zea mays* L.). *Agríc. Meteorol.*, 15: 11-31.

CRAIGMILES, J. P. y WEILING, R. M. 1971. *Temporary winter pasture studies in the Gulf Coast Rice Belt*. Texas Agric. Exp. Stn. MP-990. Texas A&M, College Station.

CROOKSTON, R. K., FOX, C. A., HILL, D. S. y MOSS, D. N. 1978. Agronomic cropping for maximum biomass production. *Agron. J.*, 70: 899-902.

DABNEY, S. M., DELGADO, J. A. y REEVES, D. W. 2001. Using winter cover crops to improve soil and water quality. *Communications of Soil Science and Plants Analyses*, 32 (7 y 8): 1221-1250.

DIAZ, R. A. y CAMPBELL, G. S. 1988. *Assessment of vapor density deficit from available air temperature information*. ASA Annual Meetings, Agron. Abstr.

DICK, W. A., MC COY, E. L. y EDWARDS, W. M. 1991. Continuous application of no tillage to Ohio soils. *Agron. J.*, 83: 65-73.

DONALD, C. M. 1962. In search of yield. *J. Aust. Inst. Agric. Sci.*, 28: 171-178.

DUNCAN, W. G. 1975. SIMAIZ: A model simulating growth and yield in corn. En: *The application of systems methods to crop production*. (Eds. D.N. Baker *et al.*). Proc. Symp. Mississippi Agríc. For. Exp. Stn. Misisipi: 32-48.

DUNCAN, W. G., LOOMIS, R. S., WILLIAMS, W. A. y HANAU, R. 1967. A model for simulating photosynthesis in plant communities. *Hilgardia*, 38: 181-205.

ECAF. 2000. *Agricultura de conservación en Europa: aspectos medioambientales, económicos y administrativos de la UE*. European Conservation Agricultural Federation. <<http://www.ecaf.org/España/First.html>>.

EDMEADES, G. O. y DAYNARD, T. B. 1979. The relationship between final yield and photosynthesis at flowering in individual maize plants. *Can. J. Plant Sci.*, 59(3): 585-601.

- EITZINGER, J., TRNKA, M., HÖSCH, J., ZALUD, Z y DUBROVSKÝ, M. 2004. Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during growing season under different soil conditions. *Ecol. Model.*, 171: 223-246.
- ENGLEHORN, A. J., PESEK, J., SHRADER, W. D. 1964. Role of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers in continuous corn culture on Nicollet and Webster soils. *Res. Bull.*, 522. Agric. Home Econ. Exptl. Stat. Iowa State Univ. Sci. Technol.
- FERNÁNDEZ-QUINTANILLA, C. 1997. Historia y evolución de los sistemas de laboreo. El laboreo de conservación. En *Agricultura de Conservación. Fundamentos agronómicos, medioambientales y económicos*. Asociación Española laboreo de Conservación/Suelos Vivos. Córdoba: 1-10.
- FISHER, D. B. 2000. Phloem transport. En: *Biochemistry and molecular biology of plants*. (Eds. B. B. Buchanan *et al.*). Amer. Soc. Plant Physiologists. Rockville, Maryland: 758-776.
- FLEURY, A. 1974. Introduction du maïs et transformation du système de culture [The introduction of maize and the transformation of the cropping system]. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de la France*, 60: 357-367.
- FORRESTER J. W. 1972. *Dinámica industrial*. El Ateneo. Buenos Aires.
- FUEHRING, H. D. 1978. Cereal forages and multiple cropping for feed production on the Southern High Plains. *Research Report, New Mexico Agricultural Experimental Station*, 376.
- GONZÁLEZ LEMOS, E. 2003. *Estudio del efecto del déficit hídrico y del método de siembra sobre el rendimiento de dos rotaciones forrajeras en Galicia*. Trabajo de investigación fin de carrera. Universidad de Santiago de Compostela.
- GOUDRIAAN, J. 1977. *Crop micrometeorology: a simulation study*. Simulation monographs. Pudoc, Wageningen.
- GOUDRIAAN, J. y VAN LAAR, H. H. 1994. Radiation in crops. En: *Modelling Potential Crop Growth Processes. Textbook with Exercises*. (Eds. J. Goudriaan y H. H. Van Laar). Kluwer Academic Publ. Dordrecht: 378-399.
- GRIFFITH, S. M. y CHASTAIN, T. G. 1997. Physiology and Growth of ryegrass. En *Ecology, production and management of Lolium for forage in de USA* (Eds. F. M. Rouquete, Jr y L. R. Nelson). CSSA Special Publication N° 24. Madison, Wisconsin: 29-43.

- GROVE J. H. y BLEVINS R. L. 1988. Correcting soil acidification in continuous corn (*Zea mays* L): N rates, tillage and time. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 19: 1331-1342.
- HELSEN, Z. R. y WEDIN, W. F. 1981. Harvested dry matter from single and double cropping system. *Agron. J.*, 73: 895-900.
- HERNAWAN, B. y BOMKE, A. A. 1997. Effects of winter cover crops and successive spring tillage on soil aggregation. *Soil Till. Res.*, 44: 109-120.
- HOOGENBOOM, G., JONES, J. W., WILKENS, P. W., BATCHELOR, W. D., BOWEN, W. T., HUNT, L. A., PICKERING, N. B., SINGH, U., GODWIN, D. C., BAER, B., BOOTE, K. J., RITCHIE, J. T. y WHITE, J. W. 1994. Crop models. En: *DSSAT Version 3. Vol 2.* (Eds. G. Y. Tsuji *et al.*). University of Hawaii. Honolulu, Hawaii.
- HOOKE M. L., GWIN R. E., HERRON G. M. y GALLAGHER P. 1983. Effects of long-term, annual applications of N and P on corn grain yields and soil chemical properties. *Agron. J.*, 75: 94-99.
- HUGHES K. A. 1985. Maize/oats forage rotation under 3 cultivation systems. 1978-83. 1. Agronomy and yield. *N. Z. J. of Agri. Res.*, 28: 201-207.
- IBSNAT. INTERNATIONAL BENCHMARK SITES NETWORK FOR AGROTECHNOLOGY TRANSFER. 1988. *Experimental design and data collection procedures for IBSNAT. The minimum data set for systems analysis and crop simulation.* IBSNAT Technical Report 1. University of Hawaii. Honolulu, Hawaii.
- IBSNAT. INTERNATIONAL BENCHMARK SITES NETWORK FOR AGROTECHNOLOGY TRANSFER. 1989. *Decision support system for agrotechnology transfer, Version 2.1. (DSSAT V2.1).* Department of Agronomy and Soil Science, College of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawaii. Honolulu, Hawaii.
- JACOBSON, B. M., JONES, J. W. y WELCH, S. W. 1995. *Decision support system to assess agronomic, economic, and environmental impacts of soybean and corn management.* ASAE paper n°. 952696. Am. Soc. Agri. Engineering. St. Joseph, Michigan.
- JAMIESON, P. D., PORTER, J. R., GOUDRIAAN, J., RITCHIE, J. T., VAN KEULEN, H. y STOL, W. 1998. A comparison of the models AFRCWHEAT2, CERES-Wheat, Sirius, SUCROS2 and SWHEAT with measurements from wheat grown under drought. *Field Crop Res.*, 55: 23-44.

- JARA, J. y STOCKLE, C. O. 1999. Simulation of water uptake in maize, using different level of process detail. *Agron. J.*, 91: 256-265.
- JOHNSON, D. R. y TANNER, J. W. 1972. Calculation of the rate and duration of grain filling in corn (*Zea mays* L.). *Crop Sci.*, 12: 485-486.
- JONES, C. A. y KINIRY, J. R. (EDS.). 1986. *CERES-Maize: a Simulation Model of Maize Growth and Development*. Texas A&M Univ. Press, College Station, Texas.
- JONES, C. A. y LUYTEN, J. C. 1998. Simulation of biological processes. En: *Agricultural systems modelling and simulation* (Eds. R. M. Peart y R. B. Curry). Marcel Dekker, Nueva York: 19-62.
- JONES, J. N. JR., MOODY, L. E. y LILLARD, L. B. 1969. Effects of tillage, no tillage, and mulch on soil water and plant growth. *Agron. J.*, 61: 719 - 721.
- 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. y RITCHIE, J. T. 2003. The DSSAT cropping system model. *Eur. J. Agron.*, 18: 235-265.
- KARLEN, D. y CAMP, C. 1985. Row spacing, plant population, and water management effects on maize in the Atlantic Coastal Plain. *Agron. J.*, 77: 393-398.
- KEE, D. D., BRANSBY, D. I., GAMBLE, B. E. y GLASS, K. M. 1995. Effect of seeding date on dry matter yield from ryegrass and small grains in south Alabama. En *Proc. Am. Forage and Grassl. Conf.* Am. Forage and Grassl. Council, Georgetown, Texas: 10-13.
- KEULEN, H. V. 1975. *Simulation of water use and herbage growth in arid regions*. Simulation Monographs. PUDOC, Wageningen.
- KINIRY, J. R. 1991. Maize phasic development. En: *Modelling plant and soil systems* (Eds. J. Hanks y J. T. Ritchie). ASA/CSSA/SSSA agronomy monograph N° 31. Madison, Wisconsin: 55-70.
- KINIRY, J. R. y BOCKHOLT, A. J. 1998. Maize and sorghum simulations in diverse Texas environments. *Agron. J.*, 90: 682-687.
- KINIRY, J. R., TISCHLER, C. R., ROSENTHAL, W. D. y GERIK, T. J. 1992. Nonstructural carbohydrate utilization by sorghum and maize shaded during grain growth. *Crop Sci.*, 32: 131-137.
- KINIRY, J. R., WILLIAMS, J. R., VANDERLIP, R. L., ATWOOD, J. D., REICOSKY, D. C., MULLIKEN, J., COX, W. J., MASCAGNI, H. J., JR., HOLLINGER, S. E. y WIEBOLD, W. J. 1997. Evaluation of two maize models for nine U.S. locations. *Agron. J.*, 89: 421-426.

- KINIRY, J. R., XIE, Y. y GERIK, T. J. 2002. Similarity of maize seed number responses for diverse set of sites. *Agronomie*, 22: 265-272.
- LAHROUNI, A., LEDENT, J. F., CAZANGA, R. S. y MOURAUX, D. 1993. Testing the CERES-Maize model in Belgian conditions. *Eur. J. Agron.*, 2: 193-203.
- LEFFELAAR, P. A. y FERRARI, T. J. 1989. Some elements of dynamic simulation. En: *Simulation and systems management in crop protection*. (Eds. R. Rabbinge, S et al.). Simulation Monograph 32. PUDOC, Wageningen.
- LLOVERAS, J. 1986. Cultivos forrajeros de invierno para rotaciones intensivas con maíz en zonas húmedas (Galicia). *Inv. Agrar.: Prod. Prot. Veg.*, 1: 317-329.
- LLOVERAS, J. 1987. Forage production and quality of several crop rotations and pastures in northwestern Spain. *Grass Forage Sci.*, 42: 241-247.
- LLOVERAS, J. 1988. Cultivos para la producción de forraje en verano en zonas húmedas. *Inv. Agrar.: Prod. Prot. Veg.*, 3: 59-70.
- LLOVERAS, J. 1990. Dry matter yield and nutritive value of four summer annual crops in north-west Spain. *Grass Forage Sci.*, 45: 243-248.
- LOPEZ CEDRÓN, F. X., BOOTE, K. J., RUÍZ-NOGUEIRA, B. y SAU, F. 2005. Testing CERES-Maize versions to estimate maize production in a cool environment. *Eur. J. Agron.*, 23: 89-102.
- LÓPEZ CEDRÓN, F. X., RUÍZ NOGUEIRA, B., PIÑEIRO, J. y SAU, F. 2002. Intensive forage rotations in Galicia: effect of irrigation and tillage system. *VII Congress of the European Society for Agronomy*: 515-516.
- LUBET, E., PLÉNET, D. y JUSTE, C. 1993. Effet à long terme de la monoculture sur le rendement en grain du maïs (*Zea mays* L.) en conditions non irriguées. *Agronomie*, 13: 673-683.
- MøLLER, E. y DJURHUUS, J. 1997. Nitrate leaching as influenced by soil tillage and catch crop. *Soil Till. Res.*, 41: 203-219.
- MANGADO URDANIZ, J. M. 1990. Resiembra de praderas. *Navarra Agraria*, 50: 65-79.
- MAPA. Anuario de estadística agroalimentaria 2003. <http://www.mapa.es/es/estadistica/pags/anuario/Anu_03/indice.asp>.
- MILTHORPE F. L. y MOORBY J. 1979. *An introduction to crop physiology*. Cambridge University Press. Cambridge.

- MONTEITH J. 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *J. Appl. Ecol.*, 9: 747-766.
- MUCHOW, R. C., SINCLAIR, T. R. y BENNETT, J. M. 1990. Temperature and solar-radiation effects on potential maize yield across locations. *Agron. J.*, 82: 338-343.
- MUNAWAR, A., BLEVINS, R. L., FRYE, W. W. y SAUL, M. R. 1990. Tillage and cover crop management for soil water conservation. *Agron. J.*, 82: 773-777.
- MURDOCK, L. W. y WELLS, K. L. 1978. Yields, nutrient removal, and nutrient concentrations of double-cropped corn and small grain silage. *Agron. J.*, 70: 573-576.
- NELSON, C. J., 1995. Photosynthesis and carbon metabolism. En *Forages. Vol 1. An introduction to grassland agriculture*. (Eds. R. F. Barnes *et al.*). Iowa State Press. Ames: 31-43.
- OKOLI, P. S., DROLSOM, P. N. y SCHOLL, J. M. 1984. Forage production and weed control in a double-cropping program. *Agron. J.*, 76: 363-366.
- PARVEZ, A., GARDNER, F. y BOOTE, K. J. 1989. Determinate and indeterminate-type soybean cultivar responses to pattern, density and planting date. *Crop Sci.*, 29: 150-157.
- PENNING DE VRIES, F. W. T., JANSEN, D. M., TEN BERGE, H. F. M. y BAKEMA, A. 1989. *Simulation of ecophysiological processes in several annual crops*. PUDOC, Wageningen.
- PHILIPS, S. H. y YOUNG, H. M., 1979. *Agricultura sin laboreo*. Hemisferio Sur. Uruguay.
- PIETERS H. 1981. Les cultures derobees. *Rev. Agric. (Bruss)*, 34: 693-700.
- PIÑEIRO, J. 1998. Implantación de praderas por siembra directa en la zona húmeda de España. *Minidía de campo sobre siembra directa*. CIAM: 20-30.
- PIÑEIRO, J., DÍAZ DÍAZ, N. y PÉREZ, M. 2001. Raigrás italiano. *Agricultura*, 827: 436-443.
- PIÑEIRO, J. y PÉREZ, M. 1995. Siembra sin laboreo de raigrás italiano en un viejo alfalar. *Agricultura*, 775: 476-482.
- PIÑEIRO, J. y PÉREZ, M. 1996. Siembra directa de las rotaciones de maíz o sorgo-raigrás italiano en dos localidades de Galicia. *Actas de la XXXVI Reunión Científica de la Sociedad Española para el Estudio de los Pastos*: 245-249.

- PIÑEIRO, J. y PÉREZ, M. 1997. Complementariedad de las rotaciones maíz/sorgo-raigrás italiano con las praderas de raigrás italiano-trébol violeta. *Actas de la XXXVII Reunión Científica de la Sociedad Española para el Estudio de los Pastos*: 183-189.
- PIÑEIRO, J. y PÉREZ, M. 2000. Direct drilling of forage maize, shorghum×Sudan grass and Italian ryegrass. *Grassland Science in Europe*, 5: 131-133.
- PONTAILLER, S. 1979. 25 ans d'agriculture finistérienne. Une production de plus en plus intensive [25 years agriculture in Finistère. More and more intensive production]. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de la France*, 65: 111-125.
- POZO IBÁÑEZ, M. DEL. 1967. La siembra de pratenses sin laboreo previo del terreno. *Actas de la VIII Reunión Científica de la Sociedad Española para el Estudio de los Pastos*: 53-58.
- RADFORD B. J., YULE, D. F., MC GARRY, D. y PLAYFORD, C. 2001. Crop responses to applied compaction and to compaction repair treatments. *Soil Till. Res.*, 61: 157-166.
- RAPHALEN, J. L. 1980. Analyse critique du sytème raygrass d'italie-mais [Critical analysis of the Italian ryegrass-maize system]. *Fourrages*, 82: 105-121.
- RAPHALEN, J. L. y BLOC, D. 1982. Le maïs fourrage dans l'ouest [Forage maize in the west]. *Perspectives Agricoles*, 63: 15-34.
- RICHARD, R. y CROOKSTON, R. K. 1979. Harvest index of corn affected by population, maturity rating and environment. *Agron. J.*, 71: 577-580.
- RITCHIE, J. T. 1972. Model for predicting evapotranspiration from a row crop with incomplete cover. *Water Resou. Res.*, 8: 1204-1213.
- RITCHIE, J. T. 1985. A user -oriented model of the soil water balance in wheat. En: *Wheat growth and modeling* (Eds. E Fry y T. K. Atkin). NATO-ASI Series. Plenum Press, 293-305.
- RITCHIE, J. T. y ALARGARSWAMI, G. 2003. Model concepts to express genetic differences in maize yield components. *Agron. J.*, 95: 4-9.
- RITCHIE, J. T., KINIRY, J. R., JONES, C. A. y DYKE, P. T. 1986. Model inputs. En, *CERES-Maize. A simulation model of maize growth and development* (Eds. C. A. Jones y J. R. Kiniry) Texas A&M University Press. College Station. Texas: 37-48.

- RITCHIE, J. T., SINGH, U., GODWIN, D. C. y BOWEN, W. T. 1998. Cereal growth, development and yield. En *Understanding options for agricultural production* (Eds. G. Y. Tsuji, G. et al.). Kluwer Academic Publishers in cooperation with ICASA. Dordrecht/Boston/Londres: 79-98.
- RITCHIE, S. W. y HANWAY, J. J. 1982. *How a corn plant develops*. Special report, 48. Iowa State Univ. Of Science and Technology. Ames, Iowa. Coop. Ext. Serv.
- RODRÍGUEZ, M., BORDEGARAI, I., BESGA, G., MARTÍNEZ, A. y PIÑEIRO, J. 1997. Corn or sorghum-Italian ryegrass foregre rotation under different cultivation systems in high rainfall areas of Spain. *Proceedings of the XVIII International Grassland Congress*. Volume I, 19: 51-52.
- RODRÍGUEZ, M., BORDEGARAI, I., MARTÍNEZ, A. y PIÑEIRO, J. 1996. Tillage methods for Italian ryegrass-maize or sorghum forage crop rotations in northern Spain. *Grasslands Science in Europe*, 1: 579-582.
- ROTH, G. y UNDERSANDER, D. (EDS). 1995. *Corn silage production, management and feeding*. ASA-CSSA-SSSA. EE.UU.
- RUÍZ NOGUEIRA, B. 1999. *Efecto de la fecha de siembra sobre el rendimiento de la soja (Glycine max (L.) Merr.) en Galicia: evaluación y mejora del modelo CROPGRO-soybean para Galicia*. Tesis doctoral. Universidad de Santiago de Compostela
- RUÍZ NOGUEIRA, B., BOOTE, K. J. y SAU, F. 2001. Calibration and use of CROPGRO-soybean model for improving soybean management under rainfed conditions. *Agr. syst.*, 68: 151-173.
- SAU, F., BOOTE, K. J., BOSTIC, W. M., JONES, J. W. y MÍNGUEZ, M. I. 2002. Testing and improving soil water balance of DSSAT 3.5 models. *VII Congress of the European Society for Agronomy*: 325-326.
- SAU, F., BOOTE, K. J., BOSTIC, W. M., JONES, J. W. y MÍNGUEZ, M. I. 2004. Testing and improving evapotranspiration and soil water balance of the DSSAT crop models. *Agron. J.*, 96: 1243-1257.
- SHIPLEY, P. R., MEISINGER, J. J. y DECKER, A. M. 1992. Conserving residual corn fertiliser nitrogen with winter cover crops. *Agron. J.*, 84 : 869-876.
- SINCLAIR, T. R. y MUCHOW, R. C. 1999. Radiation use efficiency. *Adv. Agron.*, 65: 215-265.
- SINEIRO GARCÍA, F. 1977. Técnicas de transformación del monte en pastos. *III Seminario INIA/SEA sobre Pastos, Forrajes y Producción Animal*. Centro Regional de Investigación y Desarrollo Agrario de Galicia. Mabegondo: 7-52.

- SINEIRO, F. y VALDÊS, B. 1998. *Análise de xestión de explotacións de vacún de leite*. Escola Politécnica Superior. Lugo.
- SPLINTER, W. E. 1974. Modeling of plant growth for yield prediction. *Agric. Meteorol.*, 14: 243-253.
- STAPPER, M. Y ARKIN, G. F. 1980. *CORNF: A dynamic growth and development model for maize (Zea mays L)*. Texas Agric. Exp. Sto. Res. Ctr. Program and Model Documentation. 80-2. Texas.
- STOCKLE, C. O. y KINIRY, J. R. 1990. Variability in crop radiation use efficiency associated with vapor pressure deficit. *Field Crop Res.*, 25: 171-181.
- STOCKLE, C. O y NELSON, R. 1994. Cropping systems simulation model: user's *online manual*. Washington State University. Pullman, Washington.
- THORNLEY, J. H. M. y JOHNSON. J. R. 1990. *Plant and Crop Modelling. A Mathematical Approach to Plant and Crop Physiology*. Clarendon Press. Oxford.
- TISDALL, J. M. y OADES, J. M. 1979. Stabilization of soil aggregates by the root systems of ryegrass. *Aust. J. Soil Res.*, 17: 429-441.
- TOIT, A. S. DU, PRINSLOO, M. A., WAFULA, B. M. y THORNTON, P. K. 2002. Incorporating a water-logging routine into CERES-Maize, and some preliminary evaluations. *Water Sa.*, 28: 323-328.
- TOLLENAAR, M. y HUNTER, R. B. 1983. A photoperiod and temperature sensitive period for leave number of maize. *Crop Sci.*, 23: 457-461.
- TOLLENAAR, M., DWYER, L. M. y STEWART, D. W. 1992. Ear and kernel formation in maize hybrids representing three decades of grain yield improvement in Ontario. *Crop Sci.*, 32: 432-438.
- VAN BOCKSTAELE, T., BEHAEGHE, V. y DE BEATS, A. 1979. Des cultures de mais associées a une culture derobée ou des cultures mixtres mais-legumineuses rendent-elles possible une production maximale de fourrages verts? [Do maize crops associated with a cover crop or mixed maize-legume crops make possible the highest yield of green fodder?]. *Revue d'Agriculture*, 32: 1112-1125.
- VILLALOBOS, F. J. y FERERES, E., 1990. Evaporation measurements beneath corn, cotton, and sunflower canopies. *Agron. J.*, 82: 1153-1159.
- WAGGER, M. O. y DENTON, H. P. 1989. Tillage effects on grain yields in a wheat, double-crop soybean, and corn rotation. *Agron. J.*, 81: 493-498.

- WATSON, D. J. 1947. Comparative physiological studies on the growth of field crops. I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Ann. Bot.*, 11: 41-76.
- WEIHING, R. M. 1963. Growth of ryegrass as influenced by temperature and solar radiation. *Agron. J.*, 55: 519-521.
- WILLMOTT, C. J., 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Bull. Meteor. Soc.*, 63: 1309-1313.
- WILSON, D. R., MUCHOW, R. C. y MURGATROYD, C. J. 1995. Model analysis of temperature and solar radiation limitations to maize potential productivity in a cool climate. *Field Crop Res.*, 43: 1-18.
- WIT, C. T. DE. 1965. *Photosynthesis of leaf canopies*. Verslagen van landbouwkundige Onderzoekingen (Agricultural Research Report) 663. Pudoc, Wageningen.
- XUNTA DE GALICIA. 2004. Anuario de estadística agraria 2002. <<http://www.xunta.es/conselle/ag/public/aea2002/indice.htm>>.
- ZHOU, X. M., MADRAMOOTOO, C. A., MACKENZIE, A. F., KALULI, J. W. y SMITH, D. L. 2000. Corn yield and fertiliser N recovery in water- table -controlled corn-rye-grass systems. *Eur. J. Agron*, 12: 83 - 91.