

UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA
ESCOLA POLITÉCNICA SUPERIOR
DEPARTAMENTO DE PRODUCCIÓN VEXETAL



**CRECIMIENTO Y DESARROLLO DEL CULTIVO
DEL HABA (*Vicia faba* L.). PARAMETRIZACIÓN DEL
SUBMODELO DE FENOLOGÍA DE
CROPGRO-FABABEAN**

Tesis Doctoral

Adriana Elisabet Confalone
Ingeniera Agrónoma

Directores: Dr. D. Federico Sau Sau
Dr. D. Benigno Ruíz Nogueira

Lugo, 2008

UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

ESCOLA POLITÉCNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO DE PRODUCCIÓN VEXETAL

**CRECIMIENTO Y DESARROLLO DEL CULTIVO
DEL HABA (*Vicia faba* L.). PARAMETRIZACIÓN DEL
SUBMODELO DE FENOLOGÍA DE
CROPGRO-FABABEAN**

Tesis Doctoral

Adriana Elisabet Confalone

Ingeniera Agrónoma

Directores: Dr. D. Federico Sau Sau
Dr. D. Benigno Ruíz Nogueira

Lugo, 2008

D. Federico Sau Sau, Dr. Ingeniero Agrónomo, Catedrático del Área de Producción Vegetal de la UPM y D. Benigno Ruíz Nogueira, Profesor Titular de Universidad del Área de Producción Vegetal de la USC.

INFORMAN:

Que bajo su dirección, D^a Adriana Elisabet Confalone ha desarrollado en la Escola Politécnica Superior, la presente memoria titulada: **“Crecimiento y desarrollo del cultivo del haba (*Vicia faba* L.). Parametrización del submodelo de fenología de CROPGRO-fababean”**, que presenta para optar al grado de Doctora Ingeniera Agrónoma.

Considerando que constituye un trabajo de Tesis Doctoral, autorizan 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, expiden el presente certificado en Lugo, a 1 de Septiembre de 2008

Fdo. Federico Sau Sau

Fdo. Benigno Ruíz Nogueira

Fdo. Adriana E. Confalone

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi reconocimiento a las instituciones que hicieron posible la realización de este trabajo, acogiéndome en su seno o financiando mi estancia en Lugo:

A la Escola Politécnica Superior, Departamento de Producción Vegetal de la Universidad de Santiago de Compostela (USC). Al Programa Alban que financió mi estancia en Lugo durante tres años.

A la Xunta de Galicia por financiar el Proyecto (Agronomía y modelización del cultivo de habas (Vicia faba) en Galicia; PGIDT05RAG29104PR).

Agradezco a todas las personas que colaboraron de distintas formas para que este trabajo se llevase a cabo, en especial a mis directores:

Al Dr. Federico Sau, por aceptarme para realizar estudios bajo su orientación y al Dr. Benigno Ruíz Nogueira por la búsqueda de soluciones a los problemas.

Al Dr. Jesús Moreno por su inestimable ayuda en la resolución de la parte estadística de esta tesis.

Al Profesor Juan Piñeiro por la paciencia e invaluable enseñanza.

A la Dra. M^a Victoria González por su orientación en los trabajos de laboratorio.

Al Dr. Avelino Núñez por sus indicaciones en el manejo de datos climáticos.

A Agustín Vidal Portela, Ángeles Rodríguez Núñez y Francisco Rodríguez Vilariño por la valiosa ayuda prestada en los trabajos de campo, toma de datos y procesado de muestras. A Natalia Varela, Tesalia Quintana y a la Dra. Ana María Ramos por su decisiva participación en la edición e impresión de la tesis.

A Dr. Francisco López Cedrón por la colaboración prestada en todo momento.

Al Dr. Jon I. Lizaso por su orientación en los artículos científicos.

A la Dra. Belén Díaz Hernández por la revisión final de la tesis.

Finalmente, un agradecimiento especial a todas las personas que me brindaron diariamente su amistad por ayudarme a hacer más agradable la estancia lejos de mi tierra, así como a los integrantes del área de Agrometeorología en la Facultad de Agronomía de Azul, Argentina, quienes me reemplazaron durante mi ausencia.

DEDICATORIA

A mi madre

ÍNDICE DE MATERIAS

CAPÍTULO 1: EFECTO DE LA FECHA DE SIEMBRA EN EL CRECIMIENTO Y DESARROLLO DEL CULTIVO DEL HABA (<i>Vicia faba</i> L.)	1
1.1. INTRODUCCIÓN	3
1.1.1. Importancia del cultivo	3
1.1.2. Variedades botánicas y origen del cultivo	9
1.1.3. Características ecofisiológicas del cultivo	10
1.1.3.1. Crecimiento y desarrollo del cultivo: estructura del dosel y captura de radiación	10
1.1.3.2. Hábito de crecimiento	12
1.1.3.3. Fenología	14
1.1.3.4. Fechas de siembra	17
1.1.3.5. Densidad de siembra	18
1.1.3.6. Biomasa, rendimiento y sus componentes	18
1.1.3.7. Efectos del déficit hídrico	20
1.1.4. Objetivos	22
1.2. MATERIAL Y MÉTODOS	23
1.2.1. Localización de los ensayos	23
1.2.2. Características meteorológicas de los años experimentales	25
1.2.3. Material vegetal, diseño experimental y descripción del experimento	25
1.2.4. Observaciones fenológicas	28
1.2.4.1. Cuantificación del desarrollo de los cultivos	29
1.2.4.1.1. Cálculo de la temperatura base	30
1.2.5. Acumulación temporal de la producción de biomasa y distribución de la materia seca entre los diferentes órganos	32
1.2.6. Determinación del índice de area foliar (IAF) y duración del área foliar (DAF)	33
1.2.7. Intercepción de radiación fotosintéticamente activa y eficiencia de utilización de la radiación (EUR)	34

1.2.8. Análisis del rendimiento y sus componentes	36
1.2.9. Comparación de la primera fecha de siembra del haba cv. `Alameda´ con otras leguminosas	37
1.2.10. Procesado de los datos y análisis estadísticos	38
1.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	40
1.3.1. Características agrometeorológicas	40
1.3.2. Fenología	45
1.3.2.1. Duración en días de las fases fenológicas	45
1.3.2.2. Temperatura base del cultivo	49
1.3.2.3. Comparación entre ecuaciones de tiempo térmico	53
1.3.3. Evolución de la producción de biomasa	59
1.3.4. Evolución del índice de área foliar (IAF)	68
1.3.5. Intercepción y eficiencia de utilización de la radiación fotosintéticamente activa (EUR)	71
1.3.6. Componentes del rendimiento	77
1.3.7. Comparación de la primera fecha de siembra del haba cv. `Alameda´ con otras leguminosas	80
1.4. CONCLUSIONES	88
CAPÍTULO 2: PARAMETRIZACIÓN DEL SUBMODELO DE FENOLOGÍA DE CROPGRO-FABABEAN	91
2.1 INTRODUCCIÓN	93
2.1.1. Análisis de sistemas y modelos de simulación	95
2.1.2. El modelo CROPGRO de simulación del crecimiento de leguminosas	98
2.1.2.1. Desarrollo del cultivo	101
2.1.2.2. Balance de carbono	108
2.1.2.3. Fotosíntesis del cultivo	109
2.1.2.4. Respiración de crecimiento y de mantenimiento	110
2.1.2.5. Reparto de asimilados en función del balance de carbono	113
2.1.2.6. Absorción, balance de nitrógeno y fijación simbiótica de nitrógeno	115

respecto del balance de carbono	
2.1.2.7. Consecuencias del déficit de nitrógeno sobre el crecimiento, la fotosíntesis, el reparto de asimilados y la composición de la biomasa	116
2.1.2.8. Removilización del nitrógeno y de los hidratos de carbono, senescencia y madurez	117
2.1.2.9. Balance hídrico del suelo, crecimiento de las raíces y evapotranspiración	118
2.1.3. Datos necesarios para correr el modelo	121
2.1.4. Salidas de CROPGRO	122
2.1.5. Adaptación de CROPGRO para simular el crecimiento del cultivo de haba	123
2.1.6. Parámetros de submodelo de fenología de CROPGRO - fababean	124
2.1.7. Objetivos	128
2.2. MATERIAL Y MÉTODOS	129
2.2.1. Modelos y datos empleados	129
2.2.1.1. Estrategias para la optimización de los parámetros	132
2.2.1.2. Estimadores del ajuste de los modelos	134
2.2.1.3. Tasa de aparición de hojas: calibración y validación	135
2.2.1.4. Fase reproductiva: calibración y validación	138
2.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	140
2.3.1 calibración de la tasa de aparición de nudos	140
2.3.1.1. Modelo térmico original (TH) y sus coeficientes	140
2.3.1.2. Modelo térmico modificado, evitando el retraso en la aparición de la primera hoja, con los coeficientes originales	140
2.3.1.3. Calibración de los modelos térmicos modificados	141
2.3.1.4. Efecto del fotoperíodo sobre la tasa de expansión de hojas	145
2.3.2. Evaluación de la tasa de aparición de nudos con datos independientes	148
2.3.3. Calibración del progreso hasta floración	151
2.3.3.1. Modelo fototérmico y coeficientes	151
2.3.3.2. Modelo térmico	152
2.3.3.3. Modelos con sensibilidad al fotoperíodo original	153
2.3.3.4. Modelos fotoperiódicos PPSÉN	155

2.3.3.5. Modelos fotoperiódicos CLDL	156
2.3.4. Evaluación del progreso hasta la floración con datos independientes	159
2.3.5. Calibración de la predicción de primera vaina	159
2.3.5.1. Modelo térmico original y coeficientes	159
2.3.5.2. Modelos térmicos calibrados	161
2.3.5.3. Modelos de duración del día	161
2.3.6. Evaluación de la predicción de la primera vaina con datos independientes	162
2.3.7. Calibración de la predicción de la madurez fisiológica	163
2.3.7.1. modelo térmico original y coeficientes	163
2.3.7.2. modelos térmicos calibrados	165
2.3.7.3. modelos fotoperiodicos	166
2.3.8. Evaluación de la predicción de la madurez fisiológica frente a datos independientes	166
2.4. CONCLUSIONES	168
BIBLIOGRAFÍA	175

ABREVIATURAS

ABREVIATURAS CAPÍTULO PRIMERO

- $^{\circ}\text{Cd}$: Grados día ($^{\circ}\text{Cdía}$). Unidad de tiempo térmico o suma térmica.
cv.: Cultivar.
CLDL: Longitud crítica del día por encima de la cual el desarrollo reproductivo de una especie de día largo no es afectado por la longitud del día (h).
D: Duración del subperíodo fenológico (d).
DAF: Duración del área foliar (d).
E: Emergencia.
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 ($\text{g (materia seca) MJ (PAR)}^{-1}$).
EURac.: EUR calculada con valores acumulativos de x (IPARac) e y (biomasa acumulada).
EURcc: EUR calculada con el incremento de x (IPAR) e y (incremento de biomasa).
F: Floración.
IAF: Índice de área foliar.
IAF_{max}: Índice de área foliar máximo.
IAF_c: IAF crítico.
IC: Índice de cosecha.
IPAR: Radiación fotosintéticamente activa interceptada por la cubierta (MJ m^{-2}).
IPARac.:IPAR acumulada (MJ m^{-2}).
Kc: Coeficiente de cultivo.
MF: Madurez fisiológica.
MS: Materia seca (g m^{-2}).
RG: Media mensual diaria de radiación global ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$).
T: Temperatura media de un período determinado ($^{\circ}\text{C}$).
Tb: Temperatura basal o temperatura base del proceso ($^{\circ}\text{C}$).
TCC: Tasa de crecimiento del cultivo ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$).
TM: Temperatura media diaria ($^{\circ}\text{C}$).
TMAX: Media mensual de temperatura máxima diaria ($^{\circ}\text{C}$).
TMIN: Media mensual de temperatura mínima diaria ($^{\circ}\text{C}$).
TT: Tiempo térmico o suma térmica o grados-día ($^{\circ}\text{Cd}$).
TT₀: Tiempo térmico calculado con una temperatura base de 0°C .
TT_{1.7}: Tiempo térmico calculado con una temperatura base de 1.7°C .
TTvar: Tiempo térmico calculado con temperaturas basales variables según el subperíodo fenológico del cultivo.
P: Fotoperíodo medio durante el período fenológico considerado (h).
Pp: Precipitación mensual acumulada (mm).
PAR: Radiación fotosintéticamente activa (MJ).
S: Siembra.
V: Inicio de vainas.
LL: Vainas llenas.

ABREVIATURAS CAPÍTULO SEGUNDO

- a*: Ordenada en el origen de la regresión lineal.
b: Pendiente de la regresión lineal.
CLDL: Longitud crítica del día por encima de la cual el desarrollo reproductivo de una especie de día largo no es afectado por la longitud del día (h).
CSM: Cropping system model.
d: Índice de ajuste de Willmott.
DF/día: Tasa de desarrollo fisiológico expresada como día fisiológico transcurrido por día del calendario durante una fase del desarrollo.
DPT: Días fototérmicos.
DT: Días térmicos.
DSSAT: Decision Support System for Agrotechnology Transfer.
EM-FL: Tiempo desde la emergencia a la primera flor (DPT).
FL-SH: Tiempo desde la primera flor a la primera vaina (DPT).
FL-SD: Tiempo desde la primera flor a la primera semilla (DPT).
FL-LF: Tiempo desde la primera flor al final del crecimiento de hojas (DPT).
IBSNAT: International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer.
P: Fotoperíodo medio durante el período fenológico considerado (h).
PPSEN: Pendiente de la respuesta relativa de desarrollo vs. fotoperíodo (1/h).
RMSE: Raíz cuadrada de la media de los cuadrados del error.
SD-MF: Tiempo desde la primera semilla a madurez fisiológica (DPT).
T: Temperatura media de un período determinado (°C).
T_b: Temperatura base de las temperaturas cardinales.
TH: Modelo térmico.
Topt1: Primer óptimo de las temperaturas cardinales.
Topt2: Segundo óptimo de las temperaturas cardinales.
TRIFOL: Tasa de aparición de hojas (1/DT) en el tallo principal, hojas por día térmico.
T_x: Temperatura máxima de las temperaturas cardinales.

RESUMEN

**EFFECTO DE LA FECHA DE SIEMBRA EN EL CRECIMIENTO Y
DESARROLLO DEL CULTIVO
DEL HABA (*Vicia faba* L.) Y PARAMETRIZACIÓN DEL SUBMODELO DE
FENOLOGÍA DE
CROPGRO-FABABEAN**

El haba (*Vicia faba* L.) es un cultivo tradicional de estación fría de la cuenca mediterránea. Se trata de una especie de día largo cuyos rendimientos se ven influidos por la fecha de siembra.

El objetivo de este trabajo es estudiar la ecofisiología de *Vicia faba* L. en el agroclima de Lugo, especialmente el efecto de la fecha de siembra sobre el crecimiento, desarrollo y rendimiento. Por otro lado, la base de datos obtenida se utiliza para evaluar la capacidad predictiva de la fenología del modelo CROPGRO-fababean e indicar las posibles modificaciones a realizar para predecir correctamente el desarrollo del cultivo de haba.

Para alcanzar estos objetivos se realizaron ensayos de campo utilizando el cultivar de crecimiento indeterminado 'Alameda' en condiciones no limitantes durante tres años consecutivos, desde el otoño de 2004 en la finca de prácticas de la Escola Politécnica Superior (Universidad de Santiago de Compostela, Campus de Lugo), con cinco fechas de siembra cada año (1ª.- última semana de octubre-primer semana de noviembre; 2ª.- mediados de diciembre; 3ª.- mediados de febrero; 4ª.- última semana de marzo-primer semana de abril; 5ª.- última semana de abril-primer semana de mayo) y se realizó un seguimiento de los principales parámetros ecofisiológicos.

La fecha de siembra que presentó el mayor rendimiento medio en granos (7733 kg ha⁻¹) fue la sembrada a mediados de febrero. Presentando más vainas y semillas por m² que las restantes fechas de siembra, así como un índice de cosecha más alto. Esta fecha de siembra presenta el mayor índice de área foliar (IAF), así como la mayor eficiencia en el uso de la radiación. No existieron diferencias significativas en biomasa total aérea entre esta fecha de siembra y la 2ª (mediados de diciembre).

La 1ª fecha de siembra (fines de octubre-principios de noviembre) no es recomendable para obtención de grano ya que presenta bajos rendimientos. Además, el cultivo demora mucho tiempo antes de producirse la emergencia y

luego de ésta, presenta tasas de crecimiento muy bajas, lo que beneficia el ataque de plagas y enfermedades fúngicas. Sin embargo, esta fecha posee buena cantidad de materia seca en el estadio de vainas, lo que indica que podría ser utilizada en rotación con el maíz, cuya siembra en Galicia se realiza en el mes de abril.

Las siembras de primavera (4^a fecha: última semana de marzo-primer semana de abril; 5^a fecha: última semana de abril-primer semana de mayo) tuvieron menor rendimiento en grano, que disminuye a medida que se atrasa la fecha de siembra, con menor número de vainas por m² y menor peso de mil semillas. Presentan un IAF crítico más alto que las siembra otoño-invernales, y un coeficiente de extinción de la radiación PAR (k) menor.

Las fechas de siembra extremas (1^a y 5^a) presentaron menor rendimiento, menor número de vainas por m² e índices de cosecha más bajos que las restantes fechas de siembra.

La metodología utilizada con el programa temple simulado acoplado al CROPGRO-fababean, conjuntamente con datos de campo que proveen un amplio rango de condiciones ambientales, logra ajustar los parámetros del modelo fenológico original (CROPGRO-fababean incluido en DSSAT 4.0), o de diferentes variantes del modelo original para permitir una buena predicción de tasa de aparición de hojas y de los principales eventos fenológicos (floración, primera vaina y madurez fisiológica).

El proceso de validación, realizado con una base de datos independiente, confirma el apartado anterior y permite elegir el submodelo correspondiente al proceso fenológico concreto, variante del submodelo original más adecuado con sus parámetros idóneos. Éste, no tiene por qué ser el submodelo que mejor ajuste consiguió durante el proceso de calibración.

Los parámetros óptimos varían considerablemente de un submodelo a otro.

Las predicciones de la tasa de aparición de hojas mejoran considerablemente con una mayor temperatura base, y en menor medida pero de modo sistemático cuando el submodelo incluye el efecto del fotoperiodo. Este efecto fue muy evidente en la fase de emergencia-floración, pero no pudo ser evidenciado en fases posteriores.

EFFECT OF SOWING DATE ON GROWTH AND DEVELOPMENT OF THE fababean CROP (*Vicia faba* L) AND PARAMETRIZATION OF THE CROPGRO-FABABEAN SUBMODEL OF PHENOLOGY

The fababean (*Vicia faba* L.) is a traditional cold season crop of the Mediterranean basin. This is a long day species, whose yields are influenced by the sowing date.

The aim of this paper is to examine the eco-physiology of *Vicia faba* in the agro-climate of Lugo, especially the effect of sowing date on growth, development and performance. On the other hand, the database obtained is used to evaluate the predictive ability of the phenology of the CROPGRO-fababean model and identify potential modifications to be done to correctly predict the development of a fababean crop.

To achieve these objectives, field tests were conducted using the 'Alameda' cultivar of indeterminate growth under non limiting conditions for three consecutive years since fall 2004 on the farm at Escuela Politécnica Superior

(Universidad de Santiago de Compostela, Campus Lugo), with five sowing dates each year (1st .- last week of October / first week of November; 2nd .- mid-December; 3rd .- mid-February; 4th .- last week of March / first week of April; 5th .- last week of April- first week of May) and a follow- up of the main eco-physiological parameters was carried out.

The sowing date that had the highest average yield in grains (7.733 kg ha⁻¹) was planted in mid-February, featuring more pods and seeds per m² than the remaining dates of sowing, and a higher harvest index. This sowing date had the highest leaf area index (IAF), as well as greater efficiency in the use of radiation. There were no significant differences in the total aerial biomass between the date of seeding and the 2nd (mid-December). The 1st sowing date (late October-early November) is not recommended for presenting low grain yields. In addition, the crop takes long to emerge, and then it presents very low growth rates, which benefits the attack of pests and fungal diseases. However, this date has a good amount of dry matter at the pod stage,

suggesting that it could be used in rotation with maize, whose planting is done in Galicia in April.

The spring plantings (4th date: last week of March / first week of April; 5th date: last week of April - first week of May) were lower in grain yield, which decreases as the date of planting is delayed, with fewer pods per m² and lower weight of a thousand seeds. They present a higher critical LAI than the autumn-winter sowings, and a lower extinction coefficient of radiation PAR (k). The extreme sowing dates (1st and 5th) had lower yields, lower number of pods per m² and harvest rates lower than the remaining dates of sowing.

The methodology used with the simulated annealing program coupled to CROPGRO-fababean, together with field data that provide a broad range of environmental conditions, manages to adjust the parameters of the original phenological model (CROPGRO-fababean included in DSSAT 4.0), or different variants of the default model to allow for a good prediction rate of emergence of leaves and the main phenological events (flowering, first pod, and physiological maturity).

The validation process conducted with a separate database confirms the previous paragraph and allows for the choice of this concrete phenological process, a particular variant of the original sub model more suitable to its competent parameters. This need not be the best fit sub-model that succeeded during the calibration process.

Optimal parameters vary considerably from one to another sub-model.

Predictions of the rate of leaf emergence improved considerably with a higher basal temperature, but there was no effect of the photoperiod. This effect was most evident in the emergence-flowering phase, but could not be detected in later stages.



Capítulo 1

**EFFECTO DE LA SIEMBRA EN EL CRECIMIENTO
Y DESARROLLO DEL CULTIVO DEL HABA
(*Vicia faba* L.)**

1.1. INTRODUCCIÓN

1.1.1. Importancia del cultivo

El haba (*Vicia faba* L.) es la séptima legumbre de grano en importancia en el mundo y la típica leguminosa de doble utilización (tanto para alimentación humana como animal), constituyendo en muchos países la mayor fuente de proteína en alimentación humana. En Europa, con el 17% de la producción mundial (FAO, 2006), su principal utilización es en alimentación animal (Rees *et al.*, 2000).

Se suministra en forma de pienso al ganado, tanto vacuno, como caballar y porcino. Además, su empleo en rotaciones, constante desde la agricultura romana, se debe tanto a su excelente papel en la fijación de nitrógeno atmosférico, estimado en 100 - 120 Kg N ha⁻¹ (cantidad que por supuesto puede variar enormemente, de acuerdo con las condiciones de cultivo) como a la buena estructura física que deja en el suelo. Ambas cualidades explican el papel que siempre jugó en la agricultura para “convertir” en agrícola un terreno recién roturado (Cubero, 1992).

Durante los últimos 10000 años, el hombre ha escogido y domesticado un pequeño número de plantas y animales. Se observa a lo largo de la historia de la humanidad una tendencia a que un número creciente de seres humanos dependa de un número decreciente de especies animales y vegetales. Todas las culturas agrícolas se han basado en una asociación cereal-leguminosa. Estas asociaciones, no sólo son beneficiosas para el equilibrio dietético de la alimentación de los animales, sino también por el efecto positivo de las rotaciones de cultivos.

Sin embargo, después de la segunda guerra mundial, los mayores incrementos en la producción agrícola se consiguieron mediante el aumento de las dosis de abonado nitrogenado. La síntesis de Haber-Bosch y el bajo precio de los hidrocarburos abrieron paso a la revolución verde y a un consumo creciente de abonos nitrogenados. Ante estas circunstancias el importante papel que juegan las leguminosas en la conservación de la fertilidad del suelo y en el incremento en su contenido de nitrógeno perdió importancia relativa y así, a medida que los insumos del sector agrícola empiezan a depender cada vez más de la producción de los crudos, la proporción de la Superficie Agraria Útil cultivada con leguminosas -entre ellas las habas- disminuye (Sau, 1989).

Actualmente, las tendencias en la política agraria de la Unión Europea van encaminadas hacia una producción sostenible y más respetuosa con el medio ambiente, así como a conseguir una producción agrícola más competitiva en el mercado mundial (Unión Europea, 2003). El manejo de los cultivos desde un punto de vista racional, implica el empleo de todas aquellas estrategias que permitan sacar el máximo partido de los cultivos sin comprometer el futuro de los sistemas agrícolas. En este contexto, y en el de un precio de la energía ascendente, el papel de las leguminosas en su conjunto está siendo reivindicado (López-Bellido, 2006) y comienza a tener cierta importancia en sistemas de agricultura sostenible ya que constituyen la familia botánica que ha mantenido la producción y la fertilidad de los sistemas agrarios mediterráneos desde la antigüedad, produciendo nitrógeno fijado de forma biológica, y ayudando a combatir enfermedades, plagas y malas hierbas, al romper la continuidad de los cultivos cerealísticos. En la actual agricultura comunitaria, los aportes de nitrógeno a través de la fijación en los nódulos de las leguminosas, se consideran fundamentales para una producción sostenible, tanto económica como ambientalmente (Howieson *et al*, 2000). Además, se considera que la "Agricultura Ecológica" puede contribuir a paliar la crisis de pérdida de renta por la actividad agrícola y ganadera industrial, con el consiguiente abandono progresivo del campo, siendo así una oportunidad para recuperar una parte importante del sector, como ha sido reconocido por la UE

tras la declaración de Copenhague (Conferencia Europea “Agricultura y alimentación ecológicas. Hacia una cooperación y acción en Europa”, Copenhague, Dinamarca, 2001).

Trabajos realizados en la meseta central semiárida de España mostraron lo apropiado de utilizar el haba en la rotación con cereales (Díaz-Ambrona y Mínguez, 2001).

Como ejemplo de zonas húmedas de la península ibérica, en la Cornisa Cantábrica (Asturias) el cultivo de haba está siendo estudiado (Martínez *et al.*, 2002; De la Roza *et al.*, 2004; Argamentería *et al.*, 2004; Martínez *et al.*, 2005b) con resultados positivos que sirven de base para su introducción en las explotaciones lecheras de Galicia.

En las explotaciones lecheras del Norte de España el cultivo de invierno en rotación (dos cultivos por año) con el maíz (*Zea mays* L.), más utilizado, es el raigrás italiano (*Lolium multiflorum* L.). Es el más extendido y se va repitiendo de forma continuada en el mismo terreno hasta 10-15 años (Martínez *et al.*, 2002). Este hecho, junto con la elevada productividad, hace que los requerimientos en N de estos cultivos sean altos, lo que conlleva un elevado coste además de serios problemas medioambientales y fitosanitarios. Para romper esa dinámica se han llevado a cabo trabajos en estas regiones con el fin de introducir nuevos cultivos, como son las mezclas de gramíneas con leguminosas, ya que pueden resultar beneficiosos en el ámbito edafológico y de la ecología del suelo. Así, el haba ha sido probada con resultados positivos para ser utilizada como forraje de invierno insertado en la rotación anual "haba-maíz forrajero", constituyendo una alternativa a la mezcla veza-avena (*Vicia sativa* L.-*Avena sativa* L.) o al raigrás italiano, debido a su elevada tasa de crecimiento en periodos de baja temperatura y a su alta capacidad de fijar nitrógeno atmosférico (Martínez *et al.*, 2000 ; De la Roza *et al.*, 2002). Por otro lado, este cultivo ha presentado buenas características para ensilado en asociación con triticale (*X Triticosecale* Wittmack) (Martínez *et al.*, 2002) y estudios complementarios realizados por De la Roza *et al.* (2004) demostraron que el mejor momento de corte fue en el subperíodo fenológico grano

incipiente-legumbres inmaduras.

En el contexto de la producción de forrajes dentro de una programación de rotaciones de cultivos con maíz, Pedrol y Martínez en 2003 evaluaron dos asociaciones de cereal-leguminosa: avena-veza y triticale-haba, en función de sus producciones y componentes de las mismas, encontrando que la asociación triticale-haba fue más productiva que la avena-veza, debido a su alto contenido en leguminosa y menor riesgo de encamado con respecto a la mezcla avena-veza.

La asociación maíz-soja forrajera (*Glycine max* (L.) Merr) también se ha mostrado como muy beneficiosa (De la Roza *et al.*, 2002). Sin embargo la semilla de soja precisa inoculación con *Bradyrhizobium japonicum* previa a la siembra, práctica que no es necesaria en haba ya que sus raíces se encuentran generalmente noduladas por *Rhizobium leguminosarum* autóctono, presente en el suelo gracias a plantas del género *Viciae* que son comunes de modo espontáneo en esta zona de Europa (Bond *et al.*, 1985).

En Galicia, debido al proceso de intensificación de la producción forrajera de las explotaciones de vacuno de leche que tienen que recurrir a la compra de forrajes y concentrados para atender la alimentación de su relativamente alta carga ganadera, se ha motivado una creciente demanda de información sobre cultivos forrajeros de invierno con un mayor contenido en proteínas (Iglesias y Lloveras, 1998; Flores *et al.*, 2003), que supongan una alternativa a la rotación de raigrás italiano en invierno, con maíz forrajero en verano, que continúa siendo por el momento, la rotación de dos cultivos por año más utilizada en las explotaciones lecheras de Galicia y Cornisa Cantábrica (Pérez *et al.*, 2002; Martínez *et al.*, 2002). Por otro lado, dados los cambios habidos en los últimos 20 años en el manejo de la alimentación del ganado en las explotaciones ganaderas de leche de la Cornisa Cantábrica y Galicia, se ha generalizado el uso de raciones completas casi exclusivamente a base de ensilados a lo largo de todo el año, lo que lleva a la necesidad de buscar nuevos forrajes para ensilar con altos contenidos proteicos, que contribuyan a atenuar los gastos de alimentación (Martínez *et al.*, 2005a). El aumento de los precios de los granos,

registrado durante estos últimos años, hacen aún más necesario reducir el consumo de piensos para garantizar la viabilidad económica de las explotaciones gallegas de vacuno de leche.

Por otro lado, el raigrás italiano ha pasado de ser un cultivo muy apreciado en la agricultura tradicional, por su capacidad de producir forraje en épocas frías para alimentación en verde, a convertirse en un problema por la dificultad de cosecha mecánica de los crecimientos de principios de primavera, época en que el suelo está normalmente demasiado húmedo para soportar el paso de maquinaria pesada utilizada para la recolección y en que las condiciones climáticas no son adecuadas para hacer un presecado, previo al ensilado del forraje recogido, que suele tener un contenido muy alto en humedad. Esto ha llevado a la búsqueda de opciones que ofrezcan una concentración primaveral de la producción, evitando la necesidad de realizar corte alguno en la época invernal (Martínez y Pedrol, 2006). Los resultados experimentales positivos, tanto en guisantes proteaginosos (*Pisum sativum* L.) (Iglesias y Lloveras, 1998; Flores *et al.*, 2003; Fernández-Lorenzo *et al.*, 2006) como en haba (*Vicia faba* L.) (Iglesias y Lloveras, 1998; Martínez *et al.*, 2002; De la Roza *et al.*, 2004; Argamentería *et al.*, 2004; Martínez *et al.*, 2005b), asociados sobre todo a triticale (*x Triticosecale* Wittm.), han llevado a que se estén recomendando en la actualidad y que haya explotaciones ganaderas, sobre todo de vacuno de leche, que empiezan a utilizarlos con éxito. Los estudios de la asociación de veza (*Vicia sativa* L. y *V. villosa* Roth.) con cereal (en este caso avena) son anteriores (Castro y Piñeiro, 1998), habiéndose concluído que se desaconsejaba su cultivo en Galicia porque era muy susceptible al encamado (Castro *et al.*, 2000), recomendación que se está revisando en este momento, porque la variedad de avena utilizada en los estudios fue precisamente la que menos capacidad tenía como tutora, como se demostró en trabajos posteriores (Suárez *et al.*, 2002, 2003).

Actualmente en Lugo se está asistiendo a la introducción experimental del cultivo del guisante proteaginoso en algunas explotaciones impulsado por la Diputación de Lugo como respuesta al problema planteado en 2002 tras la

aparición del ‘mal de las vacas locas’ que supuso la prohibición de harinas de origen animal como fuente de proteína. A pesar de las posibles dificultades de introducción por ser cultivos novedosos, se visualiza a corto plazo un cambio importante del uso de la tierra en Galicia por cesión en arrendamiento de las tierras abandonadas, como consecuencia de la ausencia de sus propietarios y/o herederos, que abre la posibilidad de orientarlas a la producción de cultivos de grano ricos en proteína para la alimentación de la cabaña ganadera, como es el caso de las leguminosas. Esta situación demanda mayor información sobre el comportamiento de leguminosas de grano en Galicia.

En general y a priori, se puede considerar que el haba es un cultivo de estación fría que puede ser atractivo para los agricultores ya que puede alcanzar altos rendimientos en condiciones de secano, siendo una especie muy plástica y adaptable a diferentes fechas de siembra (Loss y Siddique, 1997). Tiene una temperatura base cercana a cero que le permite crecer en periodos donde el déficit de presión de vapor es bajo, lo cual le confiere durante estos periodos una elevada eficiencia en el uso del agua (Loomis y Connor, 1992; Sau y Mínguez, 2000).

Webber (1990), y más recientemente Turner (2004), han descrito las características y el impacto del sistema “Ley farming” en la agricultura del sur de Australia, como un caso de estudio sobre el papel de las leguminosas en los sistemas agrícolas de áreas mediterráneas. Con anterioridad a la década de 1930 el cultivo de cereal, en alternancia con el barbecho desnudo, explotó los limitados recursos de los suelos cultivados en las zonas semiáridas del sur de Australia, agotándose parte de su fertilidad. En el período comprendido entre 1940 y 1960 la aplicación del sistema “Ley farming” cambió radicalmente las perspectivas de la agricultura de secano del sur de Australia. El sistema de “Ley de farming” está basado en cultivo de cereales en rotación con leguminosas forrajeras anuales, e integra la producción de cereal y ganado. El resultado neto de la implementación de este sistema ha sido el incremento de la superficie de cultivo y de los rendimientos y la elevación considerable en el número de cabezas de ganado, con aumento de la producción de lana y carne.

López-Bellido (2006) considera que este sistema australiano es un modelo a imitar en la Cuenca Mediterránea, donde hay aproximadamente 40 millones de hectáreas susceptibles de ser mejoradas.

1.1.2. Variedades botánicas y origen del cultivo

La denominación botánica de las habas es *Vicia faba* L. Se considera que es una especie dividida en cuatro variedades botánicas: *paucijuga*, una forma primitiva; *major*, de semilla grande; *equina*, con semilla de tamaño intermedio y *minor*, con semilla de tamaño pequeño (Cubero, 1974). Sin embargo, algunos autores agrupan la primera y las tres últimas en dos subespecies: *paucijuga* y *eu-faba* (Hebblethwaite, 1983). Dentro de ellas hay tipos de invierno y primavera, y también tipos mediterráneos y del norte de Europa (Bond *et al.*, 1985).

Cubero (1983) sitúa el centro de origen (zona de formación en cuanto a especie biológica) de *Vicia faba* L. en el Oriente Próximo y la zona mediterránea. Mateo-Box (1961) y Bond *et al.* (1985) citan autores que lo corroboran y otros que se inclinan por Asia Central. La variedad botánica *paucijuga* se puede encontrar desde la India a Afganistán; la *major* en el mediterráneo sur, China y Latinoamérica; la *minor* en Etiopía y norte de Europa; y la *equina* en el norte de Africa y Egipto (Duc, 1997).

El cultivar 'Alameda', utilizado en los ensayos de esta Tesis, es de hábito de crecimiento indeterminado y es un tipo intermedio entre las variedades botánicas *major* y *equina*. Fue obtenido de una variedad local por selección masal en la Unidad de Leguminosas del Centro de Investigación y Formación Agraria de Córdoba (Cubero, 1974).

1.1.3. Características ecofisiológicas del cultivo

1.1.3.1 Crecimiento y desarrollo del cultivo: estructura del dosel y captura de radiación.

El haba (*Vicia faba* L.) es un cultivo bien adaptado a las condiciones ambientales del Mediterráneo ya que es una especie cultivada desde antiguo en la zona (Newton y Hill, 1977). La respuesta del desarrollo del dosel -así como la acumulación de biomasa y su reparto- a diferentes condiciones de radiación y temperatura no difiere significativamente en el haba cultivada en regiones templadas de Australia (Turpin *et al.*, 2002).

La cubierta óptima en una zona mediterránea fue definida en el trabajo de Mínguez *et al.* (1993). Estos autores obtuvieron un índice de área foliar (IAF) crítico (aquel al que se intercepta el 95% de la radiación fotosintéticamente activa (PAR), Gardner *et al.*, 1985) en torno a 5, con una tasa de crecimiento del cultivo (TCC) de $25 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ en períodos de alta radiación precedido de otro nuboso. El IAF crítico de las habas es mayor que para otras leguminosas de grano, y más cercano al del trigo debido a que las hojas son más erectas (Mínguez *et al.*, 1993), aunque algunos autores (Dantuma y Thompson, 1983), dan valores de IAF crítico de las habas de 4. Un alto IAF en floración está relacionado con una mayor productividad en biomasa (Costa *et al.*, 1994) pero un crecimiento vegetativo excesivo disminuye el índice de cosecha (Mínguez *et al.*, 1993).

El coeficiente de extinción de la radiación (k), según la relación de Monsi y Saeki (1953), varía entre 0.75 para condiciones óptimas de regadío y 0.57 en secano en datos obtenidos con diferentes densidades de siembra. Las hojas menos erectas de otras leguminosas de grano producen valores de k en torno a 0.88 (Costa *et al.* 1994). Los valores de k para las habas se encuentran por tanto, entre el de las leguminosas y el de los cereales y gramíneas forrajeras (Mínguez *et al.*, 1993). La eficiencia en la utilización de la radiación (EUR) máxima registrada por Mínguez *et al.* (1993) en cultivos regados y fertilizados,

en condiciones mediterráneas, es de 1.79 g MJ⁻¹(PAR) aunque en otras condiciones está en torno a 1.3 - 1.4 g MJ⁻¹ de PAR (Husain *et al.* 1988).

El concepto de EUR es útil para describir y estudiar el crecimiento de los cultivos, basado en el principio de que el crecimiento es un proceso de transformación de energía radiante en energía química, por el dosel (Monteith, 1969, 1977; Gallagher y Biscoe, 1978; Hay y Walker, 1989). Las variaciones que ocurren en la habilidad de los cultivos para interceptar y utilizar la radiación durante su crecimiento, han sido objeto de una atención particular por parte de la comunidad científica. La producción de materia seca de un cultivo se puede expresar como el producto de tres términos: la radiación fotosintéticamente activa (PAR) incidente por unidad de la superficie del suelo (MJ m⁻²), la proporción de (PAR) interceptada por el cultivo (eficiencia de interceptación de PAR) y la producción de materia seca por unidad de PAR interceptada (EUR, eficiencia en el uso de la radiación, MJ g⁻¹). El producto de estos tres términos proporciona una metodología alternativa para analizar el crecimiento de los cultivos (Monteith, 1994a), y ha sido fundamental para el desarrollo de modelos simples del crecimiento de cultivos.

Para el cálculo de la EUR es importante medir la interceptación por medio de mediciones directas, ya que la estimación por medio de valores de IAF y de k puede llevar a errores (Russell *et al.*, 1989; Goudrian y Monteith, 1990). Aunque la eficiencia de interceptación de PAR es función del índice de área foliar (IAF) y del coeficiente de extinción (k, Monsi y Saeki, 1953), para un determinado cultivar, EUR puede variar con la temperatura y la disponibilidad de agua y nutrientes (Sinclair y Muchow, 1999).

Se produjo una considerable controversia sobre la validez de esta simple relación entre la radiación interceptada por la cubierta vegetal y el crecimiento de los cultivos. Algunos autores (Kiniry *et al.*, 1989) sugieren que la relación lineal entre la acumulación de biomasa y la interceptación de radiación acumulada proporciona una estimación adecuada de EUR.

Si bien este es el método más comúnmente empleado para estimar EUR, ha sido objeto de críticas por el hecho de utilizar datos acumulativos

(Demetriades-Shah *et al.*, 1994). Una forma alternativa de realizar el cálculo es utilizar la tasa de crecimiento del cultivo (TCC); es decir, el cociente entre el incremento de la biomasa entre dos muestreos consecutivos y la radiación interceptada durante ese período. Este método resulta más aceptado ya que todos los valores empleados son independientes (Demetriades-Shah *et al.*, 1992, 1994).

En una revisión bibliográfica, Sinclair y Muchow (1999) examinando los resultados de EUR de diversos cultivos, publicaron valores para habas de 1.03 (Silim y Saxena, 1993), 1.45 (Madeira *et al.*, 1988), y 2.04 g MJ⁻¹(PAR) (Fusheun y Dennett, 1982). Estos valores fueron en general más altos que los descritos para otras leguminosas (altramuz, lenteja, garbanzo), pero similares a los valores de cereales de invierno. Sinclair y Muchow (1999) sugieren además que la EUR obtenida por Fusheun y Dennett (1982) fue probablemente una sobreestimación porque se basa en muestras de biomasa de sólo tres plantas.

1.1.3.2. Hábito de crecimiento

Existen numerosos trabajos que comparan los resultados productivos obtenidos por cultivares determinados e indeterminados. Varios autores señalan que los cultivares indeterminados suelen alcanzar mayores rendimientos.

Para Nachi y Le Guen (1996) esto se debe a que en los indeterminados, el tallo principal contribuye a más del 65% del peso de grano producido, mientras que en los determinados ese valor se sitúa en torno al 50%. El menor rendimiento de los determinados vendría dado por un mayor número de tallos hijos y por lo tanto mayor competencia por asimilados. Algunos de estos hijos son estériles, produciéndose muchos abortos florales, con lo que finalmente el número de semillas obtenidas es menor y el tallo principal alcanza menor peso,

con un menor número de semillas por m².

Por su parte, Stützel y Aufhammer (1992), señalan que es un efecto de la baja densidad, que ocasiona una mayor disponibilidad de luz y mayor aparición de tallos hijos, provocando finalmente más abortos de legumbres. El aumento de la densidad es por lo tanto un factor agronómico de manejo, y el índice de cosecha (IC) obtenido en cultivares determinados es mayor que en indeterminados en las mismas condiciones de densidad. Según Stützel y Aufhammer (1991), pese a que los cultivares determinados pueden llegar a interceptar más radiación, producen menos biomasa que los indeterminados. Además, a igual biomasa, los cultivares indeterminados producen más peso de grano, al tener mayor IC.

La duración del área foliar (DAF; días) de los cultivares indeterminados también es superior (Pilbeam *et al.*, 1991). También se explica la producción superior de los cultivares indeterminados por el mayor número de nudos con legumbres por tallo, semillas por legumbre y un mayor peso de cada semilla (Pilbeam *et al.*, 1990).

En las condiciones de clima mediterráneo, con suministro de agua variable en primavera, pero con sequía terminal prácticamente ineludible, los cultivares indeterminados, al tener una fenología más flexible, son más plásticos y pueden resultar más adecuados para condiciones de secano o de riego deficitario. Al tener un periodo de floración más prolongado, estos cultivares tienen mayor capacidad de recuperación a la sequía con un riego o lluvia después de la floración que los cultivares determinados (Mínguez *et al.*, 1993; De Costa *et al.*, 1997; Sau y Mínguez, 2000).

En regadío, en alta densidad, o en ciclos cortos sin estrés, se recomendarían los cultivares determinados, ya que los indeterminados pueden producir un exceso de biomasa vegetativa (aunque no necesariamente más fotosíntesis) y un bajo IC.

1.1.3.3. Fenología

Una leguminosa anual puede considerarse bien adaptada al ambiente si consigue producir granos maduros y viables dentro de los límites que prevalecen en dicho ambiente, ya sean humanos o ambientales (Keatinge *et al.*, 1998). El haba siempre ha sido citada como un cultivo “fenológicamente difícil” de modelizar y comprender (Summerfield y Roberts, 1985; Ellis *et al.*, 1990).

En las leguminosas la fenología es regulada principalmente por la respuesta genética a la temperatura y fotoperíodo (Roberts y Summerfield, 1987), siendo considerada como una *planta de día largo cuantitativa*, según la definición de Summerfield y Roberts (1988), y Summerfield *et al.* (1991) ya que se trata de una especie cuya floración se inicia más rápidamente en días largos, pero no es inhibida (carácter cualitativo) bajo días cortos, sino sólo retrasada.

El concepto de tiempo térmico, creado por Réaumur en 1735, (Aitken, 1974) tiene en cuenta este hecho, al considerar la respuesta del cultivo a la temperatura. El tiempo térmico (grados-día o sumas térmicas) es calculado como la suma de la temperatura media diaria por encima de una determinada temperatura basal. Está implícito en el enfoque de este concepto, que la tasa de desarrollo es una función lineal de la temperatura (Monteith, 1977). Además, se supone que cuando la temperatura es inferior o igual a la temperatura base, la tasa de desarrollo es nula.

Las plantas pueden responder en forma diferente al mismo factor ambiental en los distintos subperíodos de desarrollo, y la exigencia de suma térmica es constante únicamente para aquella amplitud en la cual existe linealidad entre el desarrollo relativo y la temperatura (Wang, 1960). A pesar de la amplia cantidad de modelos existentes y de las limitaciones que el concepto de sumas térmicas tiene para explicar todas las variables determinantes de la fenología de los cultivos, sigue siendo el índice bioclimático más utilizado para

caracterizar los materiales vegetales en cuanto a la duración de los subperíodos y del ciclo completo.

El tiempo térmico puede ser modificado al incorporar respuestas cuantitativas al fotoperíodo. Distintos trabajos han propuesto diferentes modelos de tiempo térmico y fototérmico para cuantificar el desarrollo de los cultivos (Robertson, 1968; Williams, 1974; Charles-Edwards *et al.*, 1986).

La utilización del concepto de tasa de desarrollo (inversa del tiempo de duración) implementado por De Wit *et al.* (1970) fue un importante avance para conocer el comportamiento fenológico de las leguminosas. Hadley *et al.* (1983) usaron este concepto para definir la tasa de desarrollo, como la inversa del tiempo entre la emergencia y la floración de las leguminosas ($1/D$). De esa forma, un cultivar con un largo período entre emergencia y floración (D : nº de días) tendría una pequeña tasa de desarrollo. Así, se puede analizar la longitud del período por medio de una función lineal y aditiva de la temperatura y el fotoperíodo (Ellis *et al.*, 1990; McDonald *et al.*, 1994). En general, la vernalización de las semillas de leguminosas incrementa la sensibilidad a la temperatura y disminuye la sensibilidad al fotoperíodo (Ellis *et al.*, 1990)

Con respecto a la duración en días calendario, Agung y McDonald (1998) indicaron una duración del subperíodo siembra-emergencia de 17-19 días para diversos cultivares de habas con distintos tamaños de semilla. Ellis (1998) indica que la temperatura óptima de desarrollo en emergencia es de 19.9 - 26.5 °C, en un ensayo realizado en condiciones no limitantes.

El tiempo hasta la aparición de la primera flor fue de 70 a 85 días después de la siembra para diversos cultivares (Agung y McDonald, 1998). Por su parte Ellis (1998) deduce que la temperatura óptima para el progreso hacia la floración es de 19.9 a 25.4 °C según cultivares. Stützel en 1995a,b señaló que con siembras tardías se acorta el tiempo a partir de floración, produciendo un descenso del rendimiento en grano. En la literatura se encuentran datos de aparición de la primera legumbre en el intervalo de 83 a 105 días después de la siembra (Agung y McDonald, 1998), otros autores determinan que transcurren

entre 56 y 106 días desde la siembra para alcanzar esta fase, dependiendo del cultivar (Mwanamwenge *et al.*, 1999).

La duración de llenado de grano es de 43 a 63 días para diversos cultivares (Agung y McDonald, 1998) y la duración del ciclo completo del haba varía entre 124 y 128 días para estos mismos autores, mientras que Sau (1989) registra más de 150 días de ciclo total para cultivares para pienso en España.

La T_b comúnmente utilizada para trabajos en los que se maneja el concepto de tiempo térmico en haba es 0 °C, tanto para siembra-emergencia (S-E) como para las siguientes fases fenológicas (Plancquaert y Girard, 1987; Stützel, 1995a,b, Manschardi *et al.*, 1998, Boote *et al.*, 2002; Ruíz-Ramos y Mínguez, 2006).

Ellis *et al.* (1990), considerando una T_b de 0 °C, indicaron que el tiempo térmico requerido desde la siembra hasta la floración fue similar para un amplio número de cultivares y fue cercano a 1000 °Cd (grados-día). Sin embargo, Mwanamwenge *et al.* (1999) describieron diferencias entre cultivares, con sumas térmicas que variaron entre 657 y 1550 °Cd para alcanzar la floración. Por su parte, McDonald *et al.* (1994), encontraron un tiempo térmico de 606 °Cd, considerando una temperatura base de 1.7 °C para el cv 'Fiord'.

Para el ciclo completo, es necesario un mayor número de grados día y Mwanamwenge *et al.* (1999) indicaron valores comprendidos entre 2317 y 2580 °Cd.

1.1.3.4. Fechas de siembra

Durante los meses de invierno las temperaturas suelen ser subóptimas para el crecimiento del cultivo y la presencia de heladas, particularmente durante la floración, puede causar daños a veces irreversibles (Saxena *et al.*, 1981).

Según Duc (1997), *Vicia faba* requiere condiciones frescas para su desarrollo óptimo. Por ello, se suele sembrar en primavera en latitudes septentrionales, y en otoño/invierno en zonas templadas y subtropicales. Varios autores (Pilbeam *et al.*, 1990; Rengasamy y Reid, 1993; Loss *et al.*, 1997; Leport *et al.*, 1998) señalan que las siembras tempranas respecto de las tardías obtienen un mayor rendimiento en grano. Esto se explica porque con las siembras tempranas se desplaza la fase de llenado de grano a una época de menor déficit hídrico, mejorando la traslocación de asimilados y manteniendo la actividad fotosintética más tiempo (Loomis, 1983). También se provoca un adelanto en la fecha de floración (dependiente del fotoperíodo) y un alargamiento del período de antesis.

Una floración temprana produce más materia seca, ya que dispone de más tiempo para interceptar radiación solar y se alcanzan tasas de crecimiento mayores (Nachi y LeGuen, 1996). Además, con la siembra temprana se producen un mayor número de entrenudos, raíces y brotes, con la consiguiente formación más temprana y con mayor valor máximo y final de la biomasa; también se alcanza un mayor IC. A su vez, las legumbres se forman antes, se logra un mayor índice de área foliar verde y el cultivo absorbe una mayor cantidad radiación PAR. Sin embargo estos autores no describen una modificación en los valores de EUR con modificaciones de la fecha de siembra.

1.1.3.5. Densidad de siembra

Los mayores rendimientos de haba se han logrado con un espaciamiento de 25-35 cm entre filas, resultando una mejor intercepción de la radiación (Silim y Saxena, 1993) en cultivos de siembra otoñal. Según Pilbeam *et al.* (1991), esta intercepción aumenta con la densidad hasta que ésta alcanza las 60 plantas m^{-2} en cultivos de siembra de finales de invierno o principios de primavera. Sin embargo, Graf y Rowland (1987) muestran una respuesta marginal decreciente del rendimiento frente al aumento de la densidad, recomendando como densidad óptima económica 38 plantas m^{-2} .

Con una larga estación de crecimiento y bajo condiciones ambientales óptimas, no existe una respuesta adicional por encima de las 20 plantas m^{-2} , mientras en condiciones subóptimas, la densidad óptima puede ser de más de 60 plantas m^{-2} (López-Bellido *et al.*, 2005).

1.1.3.6. Biomasa, rendimiento y sus componentes

El rendimiento en semillas de las leguminosas de grano es el resultado de diferentes procesos del crecimiento de las plantas, los cuales están finalmente expresados en los componentes del rendimiento como número de vainas por planta, semillas por vaina y peso medio de dichas semillas; el más alto rendimiento en semillas es obtenido cuando dichos componentes están maximizados (Ayaz *et al.*, 2004).

Los componentes del rendimiento pueden ser afectados por manejo, genotipo y ambiente, y su estudio puede ayudar a entender las causas de la reducción en el rendimiento (Gardner *et al.*, 1985). En ciertas circunstancias es evidente que en las leguminosas, como en otros cultivos de grano, se

manifiesta el fenómeno de la “compensación de componentes de rendimiento”, por el que el aumento de un componente se ve compensado por la disminución del otro (Egli, 1998), lo que produce una cierta “plasticidad” ya que esos cambios evidentes en los componentes del rendimiento no se ven reflejados en modificaciones del rendimiento final del cultivo (Wilson, 1987).

Numerosas investigaciones (Mínguez *et al.*, 1993; De Costa *et al.*, 1997) han establecido que la acumulación total de biomasa y el rendimiento son función del IAF máximo pero aún más de la duración del área foliar (DAF; días). En cuanto a valores del rendimiento, en Duke (1981) aparecen diferentes datos según la región del planeta: 6600 kg ha⁻¹ en USA, 1000 kg ha⁻¹ en Africa y Asia y 3000 kg ha⁻¹ en Europa. Para condiciones de clima mediterráneo se han registrado hasta 8000 kg ha⁻¹ en grano, para 13 t de biomasa, con un IC de 0.61. Este IC decrece para valores de DAF mayores de 300 días en condiciones no limitantes del medio (Mínguez *et al.*, 1993). Los rendimientos estables alcanzan los 6000 kg ha⁻¹ (Grashoff, 1990).

Como la acumulación de materia seca afecta al rendimiento final, es posible utilizar como indicador del rendimiento, la materia seca al inicio de la formación de legumbres. Nachi y LeGuen (1996) han mostrado cómo dicho valor de materia seca se relaciona con el peso medio de las semillas, y el peso del tallo principal afecta al número de semillas. El número de legumbres por plantas se considera la mayor fuente de variación en el rendimiento. Silim y Saxena (1993) establecen una correlación positiva entre el rendimiento y la materia seca total, el peso medio por legumbre, el índice de cosecha, y negativa con el número de legumbres por m² y el número de semillas por legumbre. La variabilidad en el rendimiento de las leguminosas de grano está directamente relacionada con cambios en el número de semillas por unidad de superficie (Moot, 1997). Sin embargo, variaciones en el peso de las semillas, provocadas por diferentes condiciones ambientales, también pueden ser las determinantes de modificaciones en el rendimiento (Munier-Jolain y Ney, 1998).

Aunque el número de legumbres por planta ha sido considerado por muchos autores como la principal fuente de variación en el rendimiento del cultivo de haba, en condiciones muy favorables se llega a producir un exceso de legumbres -y también abortos- siendo el número de semillas por m² (dependiente del número de legumbres) el factor que más directamente afecta al rendimiento (Nachi y LeGuen, 1996). Por todo esto, y por la complejidad de las interacciones existentes es importante el estudio de los componentes del rendimiento (Ruiz Ramos, 2003).

1.1.3.7. Efectos del déficit hídrico

Si bien no es objetivo de esta tesis determinar los efectos del déficit hídrico sobre el haba, consideramos mencionar en la introducción de la misma algunos de los diversos trabajos sobre los efectos que dicho estrés produce sobre el cultivo.

En las hojas, el estrés hídrico produce un cambio en el ángulo foliar, lo cual se traduce en un cambio del coeficiente de extinción (k ; *suele disminuir*) y esto a su vez, en la cantidad de radiación fotosintéticamente activa interceptada (Ridao *et al.*, 1996). Con el estrés hídrico, la senescencia se adelanta (Mwanamwenge *et al.*, 1999) reduciendo aún más la cantidad de PAR interceptada a lo largo del ciclo, las raíces sufren cambios adaptativos (Manschadi, 1998) y aumentan los abortos florales, aunque el peso de la semilla puede no verse afectado (Nachi y LeGuen, 1996). La distribución y cantidad de las precipitaciones constituye una de las principales razones de la variabilidad en el rendimiento de *Vicia faba*, ya que el reparto de asimilados cambia en función del contenido de agua en el suelo (Grashoff, 1990).

Con el déficit hídrico disminuye la fijación simbiótica de nitrógeno (medida como la actividad de la nitrogenasa), aunque para Plies-Balzer *et al.* (1995)

ésta disminución no sea el primer factor limitante en la formación del rendimiento.

Silim y Saxena (1993), comparando cultivares locales con otros mejorados en condiciones de déficit hídrico, llegaron a la conclusión de que las variedades locales obtienen igual o mejor rendimiento, ya que producen más biomasa y su interceptación de radiación es mayor. Estos autores recomiendan, en secano, disminuir la distancia entre filas y aumentar la densidad, con lo que aumenta el rendimiento debido a una menor pérdida por evaporación de agua directamente desde el suelo y un mejor aprovechamiento de la humedad superficial. Se obtiene también mayor penetración de raíces, mejor eficiencia en el uso del agua (EUA), y un aumento de la interceptación de radiación, ya que la cubierta se cierra antes. Sin embargo, en regadío aconsejan una mayor separación puesto que no se obtienen estos efectos.

Los tratamientos de estrés moderado en floración pero sin estrés después de la floración, ayudan a controlar el desarrollo vegetativo sin que disminuya el rendimiento en semilla, estimulando el crecimiento reproductivo temprano, siendo por lo tanto preferibles a la total eliminación del estrés hídrico (Grashoff, 1990; Sau y Mínguez, 2000). En condiciones de estrés hídrico se recomienda maximizar el número de legumbres y semillas para mantener el rendimiento alto y estable. La fase de desarrollo más sensible al estrés hídrico es el llenado de grano, sobre todo en su primera parte (Grashoff, 1990). Pliés-Balzer *et al.* (1995) también incluyen la floración como período muy sensible. La reducción del rendimiento debido al déficit hídrico en estos estadíos alcanza el 50% (Mwanamwenge *et al.*, 1999). Sin embargo, Pilbeam *et al.* (1992) no encontraron ningún período especialmente crítico, aunque indican que los cultivares determinados puedan ser algo más sensibles al déficit hídrico.

1.1.4. Objetivos

Los objetivos principales que se plantean son:

1. Realizar un estudio ecofisiológico del efecto de la fecha de siembra sobre el crecimiento, desarrollo y rendimiento del haba en la comarca de Lugo, zona relativamente fría en el contexto de Galicia y de España.
2. Establecer una base de datos del cultivo de haba en el interior de Galicia, obtenidos en ensayos de campo bajo condiciones no limitantes del medio (agua y nutrientes “*ad libitum*”) sin incidencia de plagas, enfermedades y malas hierbas) que permita calibrar, mejorar y validar el modelo CROPGRO-fababean para las condiciones agrometeorológicas de Lugo.

1.2. MATERIAL Y MÉTODOS

Se realizaron ensayos de campo durante tres años consecutivos, desde noviembre de 2004. Estos ensayos corresponden con los años agrícolas 2004/2005, 2005/2006 y 2006/2007.

1.2.1. Localización de los ensayos

Los experimentos fueron realizados en la Finca de Prácticas de la Escola Politécnica Superior (EPS) de la Universidad de Santiago de Compostela (USC) situada en Lugo (43°04' N; 7°30' O; 480 m de altitud). El suelo fue clasificado como Humic Dystrudepts (USDA-SMSS, 1994).

Todos los horizontes del perfil tienen una textura franco-arenosa, con un contenido en arcilla en torno al 14% 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. Las principales características del perfil del suelo y los valores de capacidad de campo y punto de marchitez permanente fueron extraídas de Lopez-Cedrón (2006), que realizó ensayos de campo en parcelas colindantes, y están recogidas en las **Tablas 1 y 2**.

Tabla 1. Principales características del perfil del suelo de la parcela experimental (Lopez-Cedrón (2006)).

Horizonte	Profundidad (cm)	C 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

Tabla 2. Valores de capacidad de campo (CC) y de punto de marchitez permante (PMP) determinados experimentalmente para cada uno de los horizontes del perfil del suelo. Cada dato es la media de 4 repeticiones.

Horizonte (cm)	CC* (% vol)	PMP* (% vol)
<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)	--

*Desviación estándar entre paréntesis

1.2.2. Características meteorológicas de los años experimentales

El clima de la región es templado húmedo con influencia oceánica, del tipo fundamental Cfb (Köppen, 1931), que predomina en esta región de España.

Los datos agrometeorológicos diarios se obtuvieron mediante una estación meteorológica automatizada, situada en las proximidades del ensayo, siendo contrastadas con las mediciones de la Estación de la Xunta de Galicia (Campus Lugo), dependiente de la Consellería de Medio Ambiente (SIAM, Sistema de Información Ambiental de Galicia) y con datos provenientes del Observatorio Meteorológico de Rozas (provincia de Lugo) que depende del Instituto Nacional de Meteorología.

El fotoperíodo (duración del día sumado al período crepuscular) se calculó en base a la fórmula para la duración del día propuesta por Allen *et al.* (1998) y los crepúsculos se obtuvieron de tablas correspondientes a la latitud de Lugo (List, 1971).

1.2.3. Material vegetal, diseño experimental y descripción del experimento

El cultivar de haba utilizado fue 'Alameda', obtenido en forma conjunta entre el Centro de Investigación y Formación Agraria (CIFA, Junta de Andalucía) y la Universidad de Córdoba. Este cultivar es clasificado como un tipo intermedio entre las variedades botánicas *major* y *equina* (Cubero, 1974) y presenta hábito de crecimiento indeterminado.

La densidad utilizada fue de 35 plantas m⁻².

Los tratamientos consistieron en cinco fechas de siembra:

1^a.- última semana de octubre-primera semana de noviembre

2^a.- mediados de diciembre

3^a.- mediados de febrero

4^a.- última semana de marzo-primera semana de abril

5^a.- última semana de abril-primera semana de mayo

La fecha de siembra concreta para cada año en cada tratamiento puede verse en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Fechas de siembra en los experimentos realizados (periodo 2004-2007).

	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a
2004/05	05/11/04	15/12/04	17/02/05	29/03/05	05/05/05
2005/06	26/10/05	13/12/05	10/02/06	04/04/06	02/05/06
2006/07	30/10/06	20/12/06	16/02/07	27/03/07	30/04/07

Se utilizó un diseño experimental en bloques completos al azar, con tres repeticiones en el que cada unidad experimental ocupaba una superficie de 45 m². Cada año, 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.

Previamente a las siembras se prepararon, las parcelas correspondientes, mediante un pase cruzado de cultivador y otro de fresadora.

Las siembras se llevaron a cabo de modo manual y la densidad utilizada fue de 40 semillas/m² con separación entre líneas de 35 cm y aclareo manual posterior para conseguir la densidad objetivo de 35 plantas m⁻².

Se realizó la fertilización del suelo con unas dosis de 250 y 300 kg ha⁻¹ de P₂O₅ y K₂O, respectivamente. Los fertilizantes se aplicaron en forma de superfosfato de cal y sulfato potásico. Además, se encaló la superficie experimental con 3000 kg ha⁻¹ de caliza.

Todas las fechas de siembra se mantuvieron en condiciones hídricas cercanas a capacidad de campo por medio de riegos aplicados con un sistema

de goteo. Se calculó la lámina de agua multiplicando la evapotranspiración de referencia, obtenida con la ecuación de Penman-Monteith, por el coeficiente de cultivo del haba (Allen *et al.*, 1998) y restándole la precipitación del periodo considerado. Además, para determinar el momento de la aplicación del riego, se colocaron en el centro de cada parcela tres tensiómetros, con las cápsulas situadas a profundidades distintas y se regó cada vez que alguno de ellos marcaba lecturas inferiores a los umbrales indicados en la **Tabla 4**.

La dosis de agua aportada en cada riego permitió que el suelo volviera a capacidad de campo.

Tabla 4. Profundidad de colocación de los tensiómetros y lecturas umbrales por debajo de las cuales se regó el cultivo de haba.

Profundidad de colocación (cm)	Umbral de lectura tensiométrica (cbar)
35	-70
50	de -50 a -60
60	de -30 a -40

Para controlar las plagas, enfermedades y malas hierbas, se utilizaron los siguientes productos:

Herbicida:

Fomesafen 22.5% p/v (en preemergencia) en dosis de 1.5 l ha⁻¹

Fungicidas: Tebuconazol 10% p/p (100 g kg⁻¹) + Diclofluanida 40% p/p (400 g Kg⁻¹) para el control de Botritis y Alternaria en dosis de 2 kg ha⁻¹

Clortalonil (50 p/v) para el control de Antracnosis en dosis de 3.2 l ha⁻¹

Insecticida sistémico:

Thiamethoxam (25% p/p) en dosis de 500 g ha⁻¹.

1.2.4. Observaciones fenológicas

El seguimiento de la evolución temporal de la fenología de las distintas fechas de siembra del cultivo de haba se realizó *de visu*, tres veces por semana, utilizando una adaptación de la clave de estadios de desarrollo propuesta por Fehr *et al.* (1971). Los estadios considerados se transcriben en la **Tabla 5**.

Cada dos días se realizaron observaciones visuales para verificar la expansión foliar en cuatro plantas marcadas para tal fin, en cada parcela de cada fecha de siembra. Una hoja fue considerada expandida cuando la base de la misma estaba aplanada, perdiendo el enrollado característico de las hojas juveniles.

Se consideró que las plantas de cada parcela alcanzaban determinada fase o estadio de desarrollo cuando el 50% de las plantas presentaban las características morfológicas descritas en la clave. Se considera subperíodo fenológico al espacio de tiempo comprendido entre fase y fase.

Tabla 5. Estadios fenológicos considerados en el experimento (IBSNAT, 1988, basado en Fehr *et al.*, 1971).

Estadio	Descripción
Emergencia (E)	50% de las plantas con alguna parte visible sobre la superficie del suelo
Floración (F)	50% de las plantas con una flor abierta en cualquier nudo del tallo principal
Inicio de Vainas (V)	50% plantas con vainas de 0.5 cm en cualquier nudo del tallo principal
Vaina llena (VL)	50% planta con vainas verdes y por lo menos con una vaina con semillas que llenan la cavidad de la vaina, en cualquier nudo del tallo principal
Madurez fisiológica (MF)	50% plantas con vainas maduras

1.2.4.1. Cuantificación del desarrollo del cultivo

Para cuantificar el desarrollo se emplearon los días calendarios y ecuaciones tradicionales lineales de tiempo térmico (De Candolle, 1855; ecuaciones descritas más abajo) con distintas temperaturas basales (temperatura por debajo de la cual se supone que el desarrollo se detiene), y se compararon las diferentes metodologías. También se utilizó la ecuación propuesta por Summerfield y Roberts (1985) que ha sido ampliamente usada en modelos de tiempo térmico o grados-día de haba y otras leguminosas (Ellis *et al.*, 1988, 1990; McDonald *et al.*, 1994; Qi *et al.*, 1999) que permite cuantificar la respuesta del cultivo a la temperatura y fotoperíodo por medio de una regresión lineal múltiple:

$$1/D = a + b*T + c*P \quad \text{Ec. 1}$$

Donde,

D: Duración del subperíodo fenológico (d)

T: Temperatura media durante el subperíodo fenológico considerado (°C)

P: Fotoperíodo medio durante el período fenológico considerado (h)

a, *b* y *c*: coeficientes de la ecuación

Partiendo de esta ecuación, el tiempo térmico acumulado para el cumplimiento del período fenológico estudiado es igual a $1/b$ (°Cd; grados-día).

Por su parte, la ecuación de De Candolle (1855), que permite calcular el tiempo térmico, es la siguiente:

$$TT = \sum_{i=1}^n (T - Tb) \quad (\text{De Candolle, 1855}) \quad \text{Ec. 2}$$

Donde,

TT : tiempo térmico o suma térmica o grados-día acumulados en los n días (°Cd)

T : temperatura media diaria (°C)

Tb : temperatura base (°C).

Por un lado, se calcularon las sumas térmicas con una temperatura base, constante a lo largo del ciclo (TT_{TB}), proveniente de la literatura: 0 °C (Plancquaert y Girard, 1987; Stützel, 1995a,b, Manschardi *et al.*, 1998, Boote *et al.*, 2002; Ruíz-Ramos y Mínguez, 2006) y 1.7 °C (Ellis *et al.*, 1990; McDonald *et al.*, 1994). Por otra parte, se realizaron las sumas térmicas con temperaturas basales que fueron calculadas para tres (Siembra-Emergencia; Emergencia-Floración, Floración-Madurez fisiológica) subperíodos fenológicos (TT_{VAR}), según la metodología detallada más adelante (1.2.4.1.1).

Con todas las ecuaciones descritas en este apartado, se calculó el tiempo térmico que precisaron los siguientes subperíodos fenológicos (ver fases fenológicas en Tabla 5): Siembra- Emergencia (S-E), Emergencia-Floración (E-F), Floración-Aparición de primera vaina (F-V), Aparición de primera vaina-Madurez fisiológica (V-MF) y siembra-madurez fisiológica (S-MF).

1.2.4.1.1. Cálculo de la Temperatura base

Partiendo de la ecuación 1 (Summerfield y Roberts, 1985) se calculó la temperatura base para los distintos subperíodos fenológicos del cultivar 'Alameda' por el método del X-intercepto:

$$Tb = -(a + cP) / b \quad \text{Ec. 3}$$

Para cada estadio fenológico considerado, se realizó el análisis de regresión con el programa estadístico Statistix versión 4.1 que provee una tabla

con los coeficientes de la ecuación, el error estándar de las variables independientes y un análisis de la varianza para la regresión. Se obtuvieron así las temperaturas basales para los subperíodos fenológicos siguientes: Siembra-Emergencia, Emergencia-Floración y Floración-Madurez fisiológica. Llamamos a estas temperaturas basales “variables”, ya que la metodología tradicional utiliza una misma temperatura basal para todo el ciclo del cultivo.

Utilizando la ecuación 2, se realizó una comparación entre diferentes métodos usando distintas temperaturas base, fijas y variables, y también los días calendario a lo largo del ciclo. Los resultados obtenidos por medio de las distintas ecuaciones, se comparan considerando el coeficiente de variación (CV) y las desviaciones estándar en días (Ec. 4), que según Aspiazu y Shaw (1972) constituiría un mejor método de evaluación de los modelos de sumas térmicas porque la variabilidad se expresa en días:

$$desv.dias = \frac{desv.est.met}{media.met / días} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde,

desv.días: desviación estándar, considerando todas las fechas de siembra expresada en días

desv.est.met: desviación estándar, considerando todas las fechas de siembra, para cada método de suma térmica

media.met: promedio de suma térmica de todas las fechas de siembra para cada método

días: número medio de días transcurridos, en todas las fechas de siembra, para alcanzar la fase

1.2.5. Acumulación temporal de la producción de biomasa y distribución de la materia seca entre los diferentes órganos

Se cosecharon semanalmente 0.5 m² de cada parcela para realizar las determinaciones de biomasa aérea total y su distribución entre los diferentes órganos de las plantas. Para esto, de cada una de las plantas de la muestra, se separaron en: hojas, tallos y pecíolos (conjuntamente), flores, carpelos y granos. Seguidamente y antes de realizar las pesadas, 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 65 °C.

La tasa de crecimiento del cultivo (TCC) (g día⁻¹) entre dos muestreos fue determinada, para cada fecha de siembra, por medio de la siguiente ecuación:

$$TCC = (W_{i+1} - W_i) / (t_2 - t_1) \quad \text{Ec. 5}$$

En que,

W_i , W_{i+1} : materia seca aérea (g) correspondientes a los muestreos i e $i+1$, respectivamente;

t_1 , t_2 = tiempo después de la emergencia (días) en el que se realizan los muestreos i e $i+1$, respectivamente.

Además, utilizando el modelo CurveExpert versión 1.37, se ajustaron diferentes ecuaciones, que se emplean tradicionalmente para describir el crecimiento de los cultivos (Hunt, 1982), con el fin de estudiar comparativamente el rendimiento de materia seca de las cinco fechas de siembra en los tres años experimentales y su distribución estacional.

1.2.6. Determinación del índice de área foliar (IAF) y duración del área foliar (DAF)

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).

La duración del índice de área foliar (DAF; días) indica la persistencia de la superficie asimilatoria del cultivo, y se estimó a partir de la integración gráfica de la curva de evolución del IAF de cada parcela elemental a lo largo del ciclo vegetativo (Hunt, 1982), ya que este parámetro responde a la fórmula siguiente:

$$DAF = \int_{t_1}^{t_2} IAF dt \quad \text{ec. 6}$$

Donde,

t_1 es el día de la emergencia del cultivo y t_2 es el día en el que el IAF se hace nulo debido a la senescencia.

Al igual que en el caso de la biomasa aérea, se realizó un ajuste de los datos de IAF a alguno de las ecuaciones tradicionales de crecimiento de cultivos (Hunt, 1982) para permitir el análisis de los datos de los tres años de experimentación.

1.2.7. Intercepción de Radiación Fotosintéticamente Activa y eficiencia de utilización de la radiación (EUR)

Las mediciones de radiación fotosintéticamente activa (PAR) fueron efectuadas por medio de un ceptómetro (DeltaT - Devices), cada 4-5 días al medio día solar. Entonces se efectuaron diez mediciones, en diferentes puntos centrales de la parcela, tanto debajo como encima de la cubierta vegetal.

La cantidad de radiación interceptada (F) ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) por el dosel fue calculada como:

$$F = S - T \quad \text{Ec. 7}$$

En que,

S : PAR incidente (inmediatamente arriba del dosel ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$);

T : PAR transmitida a la parte inferior del dosel ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

La fracción de radiación interceptada (f) fue obtenida al dividir el segundo término de la ec. (7) por la radiación incidente (S). El porcentaje de radiación interceptada al medio-día se obtiene multiplicando por cien dicha fracción.

Para integrar la fracción de PAR durante todo el día se usó la fórmula propuesta por Charles-Edwards y Lawn (1984), corrigiendo así el valor de f medido al medio-día solar.

Con el fin de determinar con mayor precisión el IAF crítico (aquel que intercepta el 95% de la radiación incidente, cuando las parcelas de cada fecha de siembra fueron aproximándose a una intercepción de radiación de más de 70%, se intensificaron las mediciones con ceptómetro, pasando a medirse cada 2 ó 3 días.

La cantidad de PAR diaria interceptada fue calculada, multiplicando la radiación fotosintéticamente activa diaria por la fracción interceptada, obtenida mediante interpolación lineal entre dos medidas. Los valores de radiación

global fueron convertidos en radiación fotosintéticamente activa (PAR), asumiendo que el 50% de la radiación global es PAR (Szeicz, 1974).

La EUR del cultivo fue calculada por dos metodologías, la primera por medio de regresiones lineales entre los valores de materia seca producida (acumulada) a lo largo del ciclo y la radiación PAR diaria acumulada interceptada por el cultivo. La segunda, calculando la tasa de crecimiento del cultivo (TCC), es decir el incremento de la biomasa entre dos muestreos consecutivos, dividido por la radiación interceptada durante ese período. En los dos casos se realizó el análisis de la comparación de las líneas de regresión. Para eso se utilizó el programa Estatistix, que permite comparar la homogeneidad de las varianzas de las regresiones por medio del test de Bartlett (Snedecor y Cochran, 1983) en el que pequeños valores de p ($p < 0.05$) dan una evidencia de que las varianzas no son iguales. Una vez que se determinó la homogeneidad de las varianzas, se realizó la comparación de las pendientes de las regresiones mediante el test de la t . Nuevamente, pequeños valores de p indican que las pendientes difieren entre sí y las diferencias entre medias de pendientes de los distintos tratamientos fueron analizadas mediante el test de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher.

Monsi y Saeki (1953), utilizando una simplificación de la ley de Beer (enunciada para la atmósfera), describieron, de modo cuantitativo, la forma en que la radiación solar penetra en un dosel. Ellos propusieron un modelo de iluminación de los distintos estratos del dosel, en el que la cantidad de luz en un determinado nivel, disminuye exponencialmente a medida que el IAF acumulado por encima de él aumenta, o sea:

$$T = S * e^{(-k.IAF)} \quad \text{Ec. 8}$$

En que,

T y S : densidades de flujo de PAR abajo y encima del dosel vegetal, respectivamente ($\mu\text{m m}^{-2} \text{s}^{-1}$);

k : coeficiente de extinción de la luz en el dosel (adimensional)

IAF : índice de área foliar (adimensional)

Conforme con la Ec. 8, los valores de k se determinaron por medio de un análisis de regresión lineal entre el logaritmo neperiano de los valores de radiación transmitida en el dosel (T/S) y los valores de IAF .

1.2.8. Análisis del rendimiento y sus componentes

En el estadio de madurez de cosecha se muestrearon 4 m^2 por parcela para evaluar: número de plantas por m^2 , número de ramificaciones por planta, número de vainas por m^2 , número de granos por vaina, peso medio de un grano, peso de vainas y peso de la parte vegetativa, separándola en hojas y tallos más pecíolos.

La producción final de granos y el peso de mil granos (ambos secos) se estimó por el muestreo de 8 m^2 de cada unidad experimental (se agregaron 4 m^2 suplementarios a la superficie anteriormente citada para la determinación de los componentes del rendimiento).

Las determinaciones de materia seca se hicieron en estufa convectiva, a la temperatura de $65 \text{ }^\circ\text{C}$ hasta peso constante. El índice de cosecha (IC) fue obtenido por la razón entre el peso de materia seca de los granos y la materia seca aérea total en cosecha.

1.2.9. Comparación de la primera fecha de siembra del haba cv. 'Alameda' con otras leguminosas

Al detectarse problemas de enfermedades fúngicas en la primera fecha de siembra de haba 'Alameda' y siendo ésta la fecha de siembra que, a la vista de los primeros resultados obtenidos, resultaba más apta para un aprovechamiento conjunto con el maíz, se realizó durante el año experimental 2005/06, en una parcela contigua al experimento principal con distintas fechas de siembra de 'Alameda', un ensayo de campo con otros tres cultivares de haba (uno de ellos 'Alameda') y una línea de arvejón a fin de poder comparar sus respectivos comportamientos agronómicos, estudiando especialmente la incidencia de enfermedades, el rendimiento y la calidad forrajera.

Se sembraron los cultivares 'Alameda', 'Irena' y 'Diva' de haba (*Vicia faba* L.) y la línea 'IFVN 556-2376' de arvejón (*Vicia narbonensis* L.) en un diseño experimental en bloques completos al azar, con tres repeticiones, en el que cada unidad experimental ocupaba una superficie de 45 m².

La siembra de todas estas leguminosas se realizó el 26 de octubre de 2005 lográndose una densidad de 35 plantas por metro cuadrado. El riego se realizó según la metodología descrita anteriormente para el ensayo de fechas de siembra de 'Alameda'.

Los cultivares 'Irena' y 'Diva', del tipo botánico *minor*, proceden de Agri Obtentions, empresa filial del Institute National de la Recherche Agronomique de Francia. 'IFVN 556-2376' fue suministrada por el Dr. Salvador Nadal de la Universidad de Córdoba, siendo a su vez proveniente del ICARDA (Internacional Center for Agricultural Research in the Dry Areas). Para seguir la evolución temporal de la fenología de las distintas leguminosas se realizaron observaciones fenológicas visuales tres veces por semana, adoptando el mismo criterio que para el experimento de fechas de siembra de 'Alameda'.

Para realizar las determinaciones de biomasa aérea total y porcentaje de proteína, se muestrearon 0,5 m² en cada parcela en el estado vegetativo (con 6 hojas expandidas), en inicio de floración y en inicio de formación de vainas.

Las muestras cosechadas se secaron hasta alcanzar peso constante del material vegetal en una estufa de ventilación forzada a 65 °C y se molieron en molino de martillos “Christy and Norris” con tamiz de 1 mm. Sobre las muestras secas y molidas se determinó el contenido materia seca, por eliminación de la humedad residual a 100 °C, y el contenido en materia orgánica y cenizas, por combustión a 475 °C, en analizador termogravimétrico “LECO-MAC500”. El contenido en proteína bruta (PB) se determinó mediante NIRS (Near Infrared Reflectance Spectroscopy) en un espectrofotómetro NIRSystem 6500 (Foss NIRSystem, Inc., Silver Spring, Washington, USA), ubicado en cámara isoterma, dotado de un módulo alimentador giratorio y equipado con el programa WinISI II v. 1.5 (Infrasoft International, Port Matilda, PA, USA).

Cada quince días se efectuaron mediciones del índice de área foliar, IAF, con un analizador de dosel (LAI 2000, LI-COR, Inc.), que ofrece una medida indirecta del IAF por un método no destructivo.

En el estadio de madurez de cosecha se determinaron el rendimiento y sus componentes por la misma metodología que en el experimento de fechas de siembra de ‘Alameda’.

1.2.10. Procesado de los datos y análisis estadísticos

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

Los análisis estadísticos se hicieron con los programas:

SAS versión 8 para Windows (análisis de la varianza y la comparación de medias mediante el test de Duncan), Estatistix versión 8 para Windows (análisis de regresión) y CurveExpert versión 1.37 (ajuste de curvas a modelos de crecimiento).

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

```
proc anova;  
  
  class bl trat years;  
  
  model var=years bl(years) trat trat*years;  
  
  TEST h=years e=trat*years;  
  
  test h=trat e=trat*years;  
  
  means years/duncan e=trat*years;  
  
  means trat/duncan e=trat*years;  
  
run;
```

Donde bl = bloque (tres bloques); trat = 5 fehas de siembra; years = tres años de experimento 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 durante tres años de experimento.

1.3.1. Características agrometeorológicas

Es evidente que la amplia distribución temporal de fechas de siembra, empleada en los ensayos, condicionó la marcha de los elementos agrometeorológicos que afectan a la evolución fenológica y a la formación del rendimiento de los cultivos.

Las medias mensuales de radiación global (RG), precipitación (Pp) y temperatura máxima (Tmax) y mínima (Tmin) del aire para los meses de realización del experimento son presentadas en las **Tablas 6 (a, b y c)**. Los principales elementos agrometeorológicos se comparan con datos promedio del decenio 1994-2003 para radiación global y temperatura. Los datos de precipitación son comparados con el promedio histórico obtenido de una serie más larga (treinta y tres años, 1971-2003), debido a la variabilidad que presenta este elemento agrometeorológico.

Podemos observar que, en general, durante el período del primer experimento hubo mayor disponibilidad de radiación global que la que indica el promedio de los datos climáticos para Lugo (**Tabla 6a**). Las temperaturas máximas estuvieron cercanas al promedio, con excepción de los meses de febrero y diciembre donde son marcadamente menores. Los meses de junio y julio presentaron temperaturas máximas superiores a las normales. En cambio, las temperaturas mínimas estuvieron casi siempre por debajo del promedio del

decenio hasta la primavera. Estos elementos indican que el invierno 2004/05 estuvo caracterizado por días menos nubosos que la media, que dieron origen a precipitaciones y temperaturas mínimas por debajo de lo normal para esta época del año. Ya en los meses de verano (principalmente junio y julio) se observaron temperaturas máximas y mínimas más altas que el promedio; se trató de un verano más cálido que lo normal.

El otoño de 2005 se caracterizó por presentar precipitaciones y temperaturas inferiores a las esperadas para esa época del año (**Tabla 6b**).

Tabla 6a. Medias mensuales de radiación global diaria (RG), temperatura máxima diaria del aire (Tmáx), temperatura mínima diaria del aire (Tmín) y precipitación mensual acumulada (Pp) durante el año de cultivo 2004-2005 (EXP1), y el decenio (DEC) 1994-2003 para los datos de radiación global y de temperatura máxima y mínima, así como datos de la serie histórica 1971-2003 para precipitación (N).

MES	RG (MJ m ⁻² d ⁻¹)		Tmáx (°C)		Tmín (°C)		Pp (mm)	
	DEC	EXP1	DEC	EXP1	DEC	EXP1	N	EXP1
2004								
Nov.	4.8	6.4	12.9	12.2	5.0	3.5	129.2	52.6
Dic.	3.7	4.9	10.5	9.6	2.8	1.3	143.8	58.2
2005								
Ene.	5.1	6.2	11.0	10.7	2.5	1.7	115.1	44.4
Feb.	8.7	8.3	13.1	9.6	2.6	0.0	86.6	66.0
Mar.	11.5	12.7	15.0	15.6	4.2	2.6	99.9	84.6
Abr.	13.8	14.6	14.3	16.1	4.6	5.0	121.2	192.4
May.	17.3	19.1	18.5	19.5	7.8	7.7	90.3	47.6
Jun.	20.9	21.5	22.6	25.1	10.0	12.8	36.6	74.4
Jul.	20.2	21.2	23.8	25.2	12.6	13.1	34.2	21.8
Ago.	18.8	20.3	25.3	25.4	12.8	12.8	36.3	70.0
Set.	13.8	15.1	22.5	23.7	11.1	9.9	84.5	42.4
Oct.	8.8	8.7	17.9	19.7	8.7	8.5	127.3	135.2
Nov.	4.8	5.5	12.9	12.8	5.0	4.4	129.2	88.0
Dic.	3.7	5.3	10.5	5.3	2.8	1.1	143.8	71.8

Durante el segundo año experimental (**Tabla 6b**), la RG fue mayor que la del promedio climático. Las temperaturas máximas durante los meses de invierno fueron próximas o levemente menores al promedio del decenio, lo que se invirtió en los meses de verano en los que se tornaron más altas que la

media. La $T_{\text{mín}}$ en los meses de otoño e invierno se mantuvo por debajo del promedio, destacándose el valor de $-0.54\text{ }^{\circ}\text{C}$ del mes de febrero. En los meses de verano las temperaturas mínimas fueron cercanas al promedio o levemente mayores. En cuanto a las precipitaciones, el año agrícola en general se presentó más seco que el promedio histórico, con excepción de algunos meses del invierno en los que los valores pluviométricos superaron a los valores del decenio.

Tabla 6b. Medias mensuales de radiación global diaria (RG), temperatura máxima diaria del aire ($T_{\text{máx}}$), temperatura mínima diaria del aire ($T_{\text{mín}}$) y precipitación mensual acumulada (Pp) durante el ciclo de cultivo 2005-2006 (EXP2) y el decenio (DEC) 1994-2003 para los datos de radiación global y de temperatura máxima y mínima, así como datos de la serie histórica 1971-2003 para precipitación (N).

MES	RG (MJ m ⁻² d ⁻¹)		T _{máx} (°C)		T _{mín} (°C)		Pp (mm)	
	DEC	EXP2	DEC	EXP2	DEC	EXP2	N	EXP2
2005								
Nov.	4.8	5.5	12.9	12.8	5.0	4.3	129.2	88.0
Dic.	3.7	5.3	10.5	9.1	2.8	1.0	143.8	71.8
2006								
Ene.	5.1	6.0	11.0	9.8	2.5	0.3	115.1	26.6
Feb.	8.7	9.3	13.1	11.3	2.6	-0.5	86.6	137.4
Mar.	11.5	9.7	15.0	14.8	4.2	5.4	99.9	167.9
Abr.	13.8	18.3	14.3	17.4	4.6	5.8	121.2	64.4
May.	17.3	22.6	18.5	21.5	7.8	7.2	90.3	20.4
Jun.	20.9	23.0	22.6	25.6	10.0	10.5	36.6	28.6
Jul.	20.2	22.5	23.8	28.0	12.6	13.6	34.2	6.2
Ago.	18.8	22.6	25.3	25.6	12.8	12.4	36.3	29.8
Set.	13.8	14.7	22.5	25.2	11.1	11.9	84.5	72.0
Oct.	8.8	7.5	17.9	19.9	8.7	9.6	127.3	262.6
Nov.	4.8	5.9	12.9	15.4	5.0	6.7	129.2	148.8
Dic.	3.7	4.7	10.5	11.3	2.8	1.4	143.8	137.0

Durante el último año experimental (**Tabla 6c**), la radiación global presentó valores cercanos o mayores a las del decenio, con excepción de los meses de enero y febrero en los que fue menor. La temperatura máxima siguió la misma

pauta que la radiación global, mientras que la temperatura mínima se mantuvo por debajo del promedio histórico en los meses de primavera y verano. Los valores de precipitación fueron altos en comparación con los dos años anteriores del experimento. Se trató de un año con una primavera y un verano lluviosos con respecto al promedio histórico

Tabla 6c. Medias mensuales de radiación global diaria (RG), temperatura máxima diaria del aire (Tmáx), temperatura mínima diaria del aire (Tmín) y precipitación mensual acumulada (Pp) durante el ciclo de cultivo 2006-2007 (EXP3), y el decenio (DEC) 1994-2003 para los datos de radiación global y de temperatura máxima y mínima, así como datos de la serie histórica 1971-2003 para precipitación (N).

MES	RG (MJ m ⁻² d ⁻¹)		Tmáx (°C)		Tmín (°C)		Pp (mm)	
	DEC	EXP3	DEC	EXP3	DEC	EXP3	N	EXP3
2006								
Nov.	4.8	5.9	12.9	15.4	5.0	6.7	129.2	148.8
Dic.	3.7	4.7	10.5	11.3	2.8	1.4	143.8	137.0
2007								
Ene.	5.1	4.6	11.0	10.5	2.5	3.4	115.1	62.2
Feb.	8.7	6.9	13.1	12.3	2.6	3.7	86.6	136.7
Mar.	11.5	11.7	15.0	13.6	4.2	3.3	99.9	107.7
Abr.	13.8	17.3	14.3	18.6	4.6	4.3	121.2	55.2
May.	17.3	18.5	18.5	18.7	7.8	7.6	90.3	54.0
Jun.	20.9	21.5	22.6	22.3	10.0	9.5	36.6	88.4
Jul.	20.2	22.4	23.8	24.4	12.6	11.1	34.2	40.3
Ago.	18.8	19.7	25.3	24.6	12.8	11.2	36.3	49.4

Para facilitar la posterior discusión de la evolución de las fases fenológicas del cultivo así como del crecimiento, se incluye una tabla con la temperatura media y el fotoperíodo correspondientes a cada fase fenológica (detalladas en 1.3.2.) de cada una de las fechas de siembra ensayadas (**Tabla 7**).

Como es lógico, la temperatura muestra coeficientes de variación (CV) mayores que el fotoperíodo. Comparando los CV para la temperatura media (TM) de los distintos subperíodos fenológicos, los valores más altos se

encontraron en las dos primeras fechas de siembra del subperíodo Siembra-Emergencia (S-E), ya que el tercer año de experimento presentó, en los meses de noviembre y diciembre, temperaturas altas para esa época del año (**Tabla 6c**).

Con el avance del ciclo del cultivo, la temperatura media (**Tabla 7**) aumentó al transcurrir las fases fenológicas, con excepción de la 1ª fecha de siembra que presentó una temperatura media más baja en el subperíodo Emergencia-Floración (E-F) que en el anterior (S-E).

Tabla 7. Temperatura media (T; °C) y fotoperíodo medio (P; h) de cada fase fenológica para cada fecha de siembra del cultivo de haba en los tres años experimentales. El coeficiente de variación de los tres años se encuentra entre paréntesis (%).

		S-E	E-F	F-V	V-VL	VL-MF
1ª	T (°C)	10.2 (37.9)	6.8 (12.3)	10.1 (12.0)	13.1 (3.9)	16.0 (7.2)
	P (h)	10.9 (4.5)	10.9 (1.4)	13.9 (2.3)	15.0 (1.0)	16.0 (1.0)
2ª	T (°C)	6.2 (23.4)	7.7 (8.8)	11.8 (8.6)	13.4 (5.4)	17.2 (7.6)
	P (h)	10.1 (2.8)	12.0 (5.9)	14.6 (1.4)	15.5 (1.6)	16.3 (2.0)
3ª	T (°C)	7.5 (17.6)	11.2 (5.7)	12.8 (4.9)	15.7 (3.5)	18.0 (9.6)
	P (h)	12.1 (0.5)	13.9 (2.9)	15.6 (1.3)	16.0 (1.9)	16.2 (1.9)
4ª	T (°C)	10.4 (6.6)	13.6 (3.4)	17.4 (12.9)	18.1 (12.3)	19.5 (8.5)
	P (h)	14.1 (0.7)	15.3 (1.1)	16.3 (0.4)	16.0 (3.1)	16.0 (1.6)
5ª	T (°C)	13.3 (1.6)	16.3 (6.6)	17.9 (14.8)	18.7 (9.8)	19.6 (6.0)
	P (h)	15.4 (0.6)	16.1 (1.1)	16.5 (0.1)	16.1 (1.2)	15.5 (1.3)

S-E: siembra-emergencia; E-F: emergencia- floración; F-V: floración-formación de primera vaina; V-VL: primera vaina-vaina llena; VL-MF: vaina llena-madurez fisiológica.

A medida que se atrasó la fecha de siembra, el cultivo estuvo expuesto a temperaturas más altas, con excepción de la 2ª fecha que durante el subperíodo S-E soportó una temperatura media más baja (6.2 °C) que durante la 1ª fecha (10.2 °C).

En cuanto al fotoperíodo, la 1ª fecha fue sembrada cuando las horas de luz estaban acortándose, produciéndose entre el 15 y el 30 de diciembre los valores más bajos de fotoperíodo, por lo que se pudo apreciar el aumento del mismo durante el subperíodo Floración-Inicio de vainas (F-V) (**Tabla 7**).

La 2ª fecha, en cambio, si bien fue sembrada cuando los días estaban acortándose (mediados de diciembre), en pocos días ya se observó un alargamiento del fotoperíodo, que queda patente en el subperíodo Emergencia-Floración (E-F), a diferencia de lo ocurrido con la primera fecha de siembra (**Tabla 7**).

El ciclo entero de la 3ª fecha de siembra transcurrió durante una parte del año de fotoperíodo creciente, y por tanto se observó un claro aumento en el fotoperíodo de las fases fenológicas sucesivas, pasando de tener 12.1 h a 16.2 h en los subperíodos Siembra-Emergencia y Vainas-Madurez fisiológica, respectivamente.

Sólo la última fase de la 4ª fecha de siembra estuvo expuesta a un acortamiento del fotoperíodo, mientras la 5ª fecha después de la floración creció en condiciones de disminución del fotoperíodo, con valores de fotoperíodo medio de 15.5 h para el último subperíodo de desarrollo.

1.3.2. Fenología

1.3.2.1. Duración en días de las fases fenológicas

A medida que se atrasó la fecha de siembra, se observó un acortamiento en días del ciclo total del cultivo (**Tabla 8**).

En las dos primeras fechas de siembra (última semana de octubre a primera semana de noviembre y la siembra de mediados de diciembre), el subperíodo S-E estuvo sujeto a una mayor variabilidad interanual de las temperaturas (**Tabla 7**), por lo que se presentaron grandes diferencias en el número de días de duración de la fase, variando entre 13 y 28 días, para la 1ª fecha de siembra, mientras en la 2ª los valores oscilaron entre 33 y 48 días. La segunda fecha de siembra, afectada por las bajas temperaturas de este subperíodo, tuvo una importante demora entre siembra y emergencia, tal como se puede ver en la **Tabla 8** para los tres años de cultivo. Considerando el

promedio de las cinco fechas de siembra de cada experimento, la duración media en días de este subperíodo varió entre 19 y 27 días. Algunos autores han descrito valores de 10-28 días desde la siembra a la emergencia para diversos cultivares en trabajos realizados en el Sur de Australia (McDonald *et al.*, 1994; Agung y McDonald, 1998). Nosotros hemos medido valores comprendidos entre 13 y 48 días, por tanto hemos observado una mayor variabilidad en la duración de esta fase, lo cual no es de extrañar ya que el rango de fechas de siembra y de temperaturas asociadas a ellas fue muy amplio, contemplando incluso fechas de siembra sin interés comercial.

En la primera fecha de siembra del primer año de cultivo se observó la aparición de enfermedades fúngicas, atribuibles probablemente a las bajas temperaturas, la elevada humedad relativa y la lentitud de arranque del cultivo. Estas enfermedades fueron controladas químicamente, aplicándose tratamientos preventivos a las fechas restantes.

El subperíodo fenológico Emergencia-Floración presentó un fuerte acortamiento a medida que las fechas de siembra fueron atrasándose, pasando de 112-135 días para la primera fecha, hasta 31-36 días para la última fecha de siembra. Esta reducción de la duración de la fase fue debida principalmente a la acción conjunta de las temperaturas y del fotoperíodo (**Tabla 7**). Ambas variables climáticas medias a lo largo de la fase tendieron a aumentar con la fecha de siembra (desde 6.8 hasta 16.3 °C; desde 10.9 hasta 16.1 h) y acortaron la duración de la fase el inicio de la floración, ya que es ampliamente asumido (Evans, 1959), que *Vicia faba* L. es una *Planta de Día Largo Cuantitativa*, tal como lo definen Summerfield y Roberts (1988), y Summerfield *et al.* (1991), o sea, una planta cuya floración se inicia más rápidamente en días largos, pero no es inhibida (carácter cualitativo) bajo días cortos, sino sólo retrasada.

Considerando los valores promedio de las cinco fechas de siembra de cada experimento, la duración media de la fase E-F varió entre 61 y 67 días. McDonald *et al.* (1994) establecieron valores para este subperíodo que variaron entre 34 y 96 días, dependiendo del cultivar. Nosotros, con un amplio rango de

fechas de siembra hemos observado valores incluso más dispersos (31-135 días).

Al retrasar la fecha de siembra, el subperíodo fenológico Floración-Inicio de vainas (F-V) presentó un fuerte acortamiento, pasando de 24-38 días en la primera fecha de siembra a 6-13 días en la cuarta fecha de siembra (**Tabla 8**). Este subperíodo mostró tanto en el primero como en el último año de cultivo, un pequeño alargamiento en los valores de la última fecha de siembra (5^a), con respecto a la cuarta (pasando de 6 a 7 días en 2004-2005 y de 13 a 15 días en 2006-2007). Una explicación para este alargamiento del subperíodo podría ser el efecto fotoperiódico sobre la especie ya que durante este subperíodo se produce el acortamiento del fotoperíodo (alrededor del 21 de junio). Esto no se observa durante el segundo año experimental, en el que el subperíodo F-V se inicia un poco antes que en los otros años, por lo que el cultivo pasa menos días con el fotoperíodo en disminución.

Los datos tomados en nuestros experimentos muestran que esta fase se produce a los 166-177 días después de la siembra para la primera fecha y 52-64 días para la última fecha. En la literatura se encuentran datos de aparición de la primera legumbre a los 83-105 días después de la siembra (Agung y McDonald, 1998), otros autores determinan que transcurren entre 56 y 106 días desde la siembra para alcanzar esta fase, dependiendo del cultivar (Mwanamwenge *et al.*, 1999). Stützel en 1995 a,b señaló que con siembras tardías se acorta el tiempo a partir de floración, produciendo un descenso del rendimiento en grano. En nuestro experimento los valores promedio de F-V de las cinco fechas de cada ensayo variaron entre 13 y 21 días.

Tabla 8. Duración en días de cada subperíodo fenológico (subp.) para cada una de las fechas de siembra de habas de los tres años experimentales (trat.), así como el promedio de todas las fechas de siembra.

2004/2005

Subp.\trat.	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	Promedio
S-E	28	36	34	23	14	27
E-F	112	79	49	36	31	61
F-V	26	23	10	6	7	14
V-VL	23	17	14	16	21	18
VL-M	45	46	44	30	25	38
S-MF	234	201	147	111	98	158
E-MF	206	165	113	88	84	131

2005/2006

Subp.\trat.	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	Promedio
S-E	18	48	35	17	13	26
E-F	135	78	48	42	32	67
F-V	24	11	9	13	10	13
V-VL	18	33	31	24	20	25
VL-M	50	63	54	43	41	50
S-MF	227	200	146	108	96	155
E-MF	209	152	111	98	64	127

2006/2007

Subp.\trat.	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	Promedio
S-E	13	33	19	19	13	19
E-F	116	69	62	40	36	65
F-V	38	23	15	13	15	21
V-VL	24	29	22	24	19	24
VL-M	34	44	40	32	22	34
S-MF	225	198	158	128	105	163
E-MF	212	165	139	109	92	143

S-E: siembra-emergencia; E-F: emergencia- floración; F-V: floración-formación de primera vaina; V-VL: primera vaina-vaina llena; VL-M: vaina llena-madurez fisiológica; S-MF: ciclo completo, desde la siembra a la madurez fisiológica; E-MF: ciclo completo, desde la emergencia del cultivo.

La duración del subperíodo V-VL parece estar regido como otros procesos fenológicos por la marcha de las temperaturas, sin detectarse en algunas fechas el acortamiento por el atraso de la siembra (**Tabla 8**). La segunda fecha de siembra fue la que presentó la mayor duración de este subperíodo, variando entre 46 y 29 días, siendo para la quinta fecha de 19-21 días.

Ya en la etapa Inicio de Vainas-Madurez fisiológica, se observa una disminución de la duración del subperíodo desde la segunda a la quinta fecha de siembra (**Tabla 8**). Sin embargo, la primera fecha muestra, para este subperíodo, una duración en días menor que la segunda e incluso que la tercera. Mientras Agung y McDonald (1998) observaron en Australia una duración de este subperíodo comprendido entre 43 y 46 días, nosotros hemos medido valores entre 22 y 63 días.

Considerando el ciclo completo (S-MF), los valores variaron entre 225 y 234 días (media de 229 días) para la primera fecha de siembra y 96 -105 días (media de 100 días) para la última fecha de siembra (**Tabla 8**). Por tanto, el retraso en la fecha de siembra consiguió acortar el ciclo hasta un 56%. Para el ciclo completo, algunos autores señalaron una duración de 124-128 días (Agung y McDonald, 1998), mientras que Sau (1989) registró más de 150 días en el ciclo completo del haba en trabajos realizados en el valle medio del Guadalquivir con el cv. 'Alameda'.

1.3.2.2. Temperatura base del cultivo

Para determinar la temperatura basal (T_b) de los principales estadios fenológicos, se utilizaron los coeficientes obtenidos de las regresiones lineales múltiples con la ec. 1, descrita en Materiales y Métodos. Estos coeficientes se muestran en la Tabla 9.

En todos los subperiodos considerados, el efecto del fotoperíodo fue no significativo ($p < 0.05$) por lo que no se tuvo en cuenta en el ajuste de las ecuaciones, calculándose $T_b = -a/b$. De esta forma, las T_b encontradas fueron:

1.7 °C para los subperíodos S-E y E-F, y 2.3 °C y 2.5 °C para los subperíodos F-V y V-MF, respectivamente (Tabla 9). Cabe destacar que para determinar T_b para la fase S-E, hubiese sido mucho más adecuado utilizar la temperatura del suelo, ya que es la que realmente afecta al proceso, y no la del aire. Se ha utilizado la del aire, porque sólo se disponía de ésta. Por otro lado, se considera que la otra variable que puede afectar el tiempo térmico que requiere la fase S-E, la humedad del suelo, estuvo siempre en condiciones óptimas, suelo cercano a capacidad de campo, y que por tanto no frenó la tasa de desarrollo.

Para todos los subperíodos fenológicos considerados, la tasa de desarrollo, expresada como la inversa de la duración del subperíodo, tuvo una fuerte correlación con el modelo lineal aditivo entre temperatura y fotoperíodo, con una respuesta significativa a la temperatura ($p < 0.05$) en todas las fases y un efecto no significativo para el fotoperíodo. Esto puede deberse a una falta de sensibilidad del cultivar de haba utilizado o también al hecho constatado en otras especies donde el efecto de la temperatura sobre el desarrollo es mayor que el efecto fotoperiódico, éste queda enmascarado al tratarse de datos provenientes de experimentos de campo donde fotoperíodo y temperatura están estrechamente correlacionados. (Massingnam y Angelocci, 1993). Por esta razón, algunos autores indican que para identificar la respuesta de ciertos cultivos al fotoperíodo deben ser analizados bajo condiciones ambientales controladas (Goyne y Hammer, 1982). Por otro lado, la simplicidad del modelo, que emplea valores medios registrados para estas dos variables ambientales a lo largo de la fase estudiada, puede dificultar detectar de modo estadístico el efecto de la variable que tiene menor impacto.

Tabla 9. Coeficientes de la ec.1 (ver Material y Métodos) con el error estándar entre paréntesis, (e.e) obtenidos desde el análisis de regresión múltiple de la tasa de desarrollo durante distintas fases fenológicas del haba cv. 'Alameda' considerando la temperatura y el fotoperíodo medios, y temperatura base (Tb) correspondiente derivada para cada subperiodo fenológico.

	a	b	c	r ²	Tb (°C)
S-E	-0.01056	0.00626	0.00000846 NS*	0.91	1.7
(e.e)	(0.001095)	(0.000803)	(0.00120)		(0.11234)
E-F	-0.00358	0.00206	0.0002872 NS	0.96	1.7
(e.e)	(0.00667)	(0.000479)	(0.0008638)		(0.12452)
F-V	-0.01654	0.00710	0.0001500 NS	0.97	2.3
(e.e)	(0.002785)	(0.0006905)	(0.00234)		(0.21012)
V-MF	-0.00300	0.00122	0.000170 NS	0.89	2.5
(e.e)	(0.00270)	(0.0001584)	(0.00119)		(0.22121)

S-E: siembra-emergencia; E-F: emergencia-floración; F-V: floración-primera vaina; V-MF: primera vaina-madurez fisiológica.

* NS: no significativo ($P > 0.05$) y por lo tanto, no fue utilizado en el ajuste.

El error estándar (ee) de la Tb fue calculado como:

$$ee = \sqrt{\frac{\text{var } a - 2 * k * \text{cov ar}(a,b) + k^2 * \text{var } b}{b^2}}$$

(Jesús Moreno Gonzalez, comunicación personal)

Donde,

$\text{Var}(a)$ y $\text{Var}(b)$: varianzas de los errores asociados a a y b .

$\text{Cov}(a,b)$: covarianza del error entre a y b

En trabajos realizados en el Sur de Australia con cv 'Fiord' para el subperíodo S-E se encontró una T_b semejante a la de nuestro experimento ($1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$) (McDonald *et al.*, 1994). Qi *et al.* (1999) publicaron que la T_b para este mismo subperíodo puede ser de -0.1 a $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ en función del cultivar, en tanto Manschardi *et al.* (1998) indican que la T_b es de $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. No obstante, el valor de T_b obtenido en este trabajo para la fase S-E es discutible al emplear temperaturas de aire y no de suelo.

En nuestro experimento y siguiendo esta metodología, el tiempo térmico correspondiente a cada subperíodo fenológico ($TT = 1/b$) fue de $160.0\text{ }^{\circ}\text{Cd}$ para el subperíodo S-E; $485.4\text{ }^{\circ}\text{Cd}$ para E-F; 140.8 para F-V y de 819.6 para V-MF, siendo la suma para el ciclo completo de $1605.6\text{ }^{\circ}\text{Cd}$.

Qi *et al.* (1999), considerando una T_b que varió entre -0.1 y $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, en función del cv., obtuvo valores de TT , para el subperíodo S-E, comprendidos entre 172 y $214\text{ }^{\circ}\text{Cd}$. McDonald *et al.* (1994) encontraron para el cv. 'Fiord' una suma térmica que varió entre 175 y $316\text{ }^{\circ}\text{Cd}$ para este subperíodo, mientras en el subperíodo E-F determinaron un TT que varió entre 534 y $889\text{ }^{\circ}\text{Cd}$ ($T_b\ 1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$). Estos datos se acercan bastante a los encontrados en nuestro experimento ($645\text{ }^{\circ}\text{Cd}$ desde la siembra a la floración). Para otros cultivares el tiempo térmico en E-F varió entre 591 y $1265\text{ }^{\circ}\text{Cd}$, según datos publicados por estos mismos autores. Ellis *et al.* (1990) indicaron que el TT requerido desde la siembra hasta la floración fue similar para un amplio número de cultivares y fue cercano a $1000\text{ }^{\circ}\text{Cd}$.

No se han encontrado datos publicados en los que se utilizara esta misma metodología en los subperíodos fenológicos posteriores a floración, para poder contrastar con ellos nuestros resultados.

1.3.2.3. Comparación entre ecuaciones de tiempo térmico

A fin de cuantificar el desarrollo del cultivo en el tiempo, se utilizó la ec.2 de tiempo térmico (ver Material y Métodos) con una temperatura base para todo el ciclo de 0 °C (TT_0) y 1.7 °C ($TT_{1.7}$) (Plancquaert y Girard, 1987; Stützel, 1995a,b, Manschardi et al., 1998, Boote et al., 2002; Ruíz-Ramos y Mínguez, 2006; Ellis *et al.*, 1990; McDonald *et al.*, 1994) (**Tabla 10**). También se utilizó la suma térmica calculada con las temperaturas basales halladas para cada subperíodo fenológico (1.7, 1.7, 2.3 y 2.5 °C; S-E, E-F, F-V y V-MF, respectivamente; TT_{var}) a lo largo del ciclo del cultivo partiendo de la ec. 1 (**Tabla 11**). Todas estas ecuaciones de tiempo térmico serán comparadas con la duración en días de cada subperíodo analizado (**Tabla 12**). De los métodos empleados, se considerará que el mejor es el que posea los menores valores de coeficiente de variabilidad (CV) y desvío en días (Desv.día). Como el análisis a través de los coeficientes de variabilidad tiene un valor relativo, porque dependen del valor de la media, se recurre a un análisis similar, pero efectuado a través de las desviaciones estándar en días, que según Aspiazu y Shaw (1972) constituiría un mejor método de evaluación de los modelos de sumas térmicas (**Tabla 13**).

En los subperíodos S-E y V-MF con todos los métodos analizados fue la 2ª fecha de siembra la que requirió mayor tiempo térmico y calendario para alcanzar los estadios de emergencia y madurez fisiológica. En cambio en los subperíodos E-F y F-V, fue la 1ª fecha la que demandó más días para alcanzar las fases de floración y formación de vainas, y fue también esta fecha de siembra la que necesitó los más altos valores de tiempo térmico y calendario para completar el ciclo del cultivo (S-MF) (**Tablas 10, 11 y 12**)

Considerando el tiempo térmico para alcanzar la emergencia, con una T_b de 0 °C (TT_0), vemos que éste varió entre 173.4 y 244.4 °Cd (**Tabla 10**). Mwanamwenge *et al.* (1999) no encontraron diferencias entre cultivares de

haba, ya que todos emergieron a los 148 °Cd en trabajos realizados en el SO de Australia bajo riego.

En el subperíodo E-F (TT_0) los valores encontrados en nuestros experimentos variaron entre 538.5 y 795.9 °Cd. Mwanamwenge *et al.* (1999) indican diferencias entre distintos cultivares, con sumas térmicas que variaron entre 657 y 1550 °Cd para alcanzar la floración. Ruíz-Ramos y Mínguez (2006) encontraron valores de TT para el cv. 'Alameda' que variaron entre 400 y 600 °Cd para este mismo subperíodo fenológico.

Tabla 10. Sumas térmicas medias (°Cd) de tres años de experimentos requeridas por las cinco fechas de siembra del cultivo de habas para completar los sucesivos subperíodos fenológicos, considerando una temperatura base de 0 °C (TT_0) y 1.7 °C ($TT_{1.7}$).

Fecha	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a
TT_0					
S-E	173.4 ± 2.0	244.4 ± 9.0	201.4 ± 19.4	208.4 ± 37.4	178.7 ± 6.8
E-F	795.9 ± 15.4	547.9 ± 12.2	609.5 ± 12.2	587.5 ± 65.0	538.5 ± 5.4
F-V	288.7 ± 11.7	265.1 ± 19.7	162.5 ± 15.5	157.8 ± 55.7	187.1 ± 40.2
V-MF	948.8 ± 15.2	1060.4 ± 11.4	1050.2 ± 32.2	966.1 ± 23.7	793.6 ± 25.3
S-MF	2217.7 ± 18.9	2111.2 ± 17.3	2023.7 ± 2.8	1919.8 ± 12.3	1698.1 ± 15.2
$TT_{1.7}$					
S-E	137.7 ± 11.1	182.3 ± 8.2	158.4 ± 10.2	163.7 ± 9.9	154.7 ± 4.2
E-F	605.7 ± 12.3	424.2 ± 13.2	515.2 ± 14.2	523.4 ± 14.1	481.6 ± 15.3
F-V	245.1 ± 15.3	225.9 ± 13.4	141.25 ± 16.6	141.6 ± 20.3	168.3 ± 12.3
V-MF	841.8 ± 15.3	946.4 ± 15.8	938.1 ± 18.8	875.1 ± 14.1	720.5 ± 20.3
S-MF	1830.3 ± 8.5	1770.8 ± 9.2	1761.4 ± 8.4	1713.9 ± 6.3	1526.4 ± 6.1

E-F: emergencia- floración; F-V: floración-formación de primera vaina; V-MF: vaina-madurez fisiológica; S-MF: ciclo completo, desde la siembra a la madurez fisiológica.

En el subperíodo F-V los valores de TT_0 de nuestro experimento variaron entre 157.8 °Cd y 288.7 °Cd (entre 904.3 °Cd y 1258 °Cd desde la siembra). Mwanamwenge *et al.* (1999) trabajando con diferentes cultivares bajo riego determinaron que el TT_0 para alcanzar el estadio de primera vaina varió entre 903 y 1790 °Cd.

En el subperíodo V-MF se alcanzaron valores de TT ($T_b = 0$ °C) entre 793.6 y 1060.4 °Cd. Considerando el ciclo completo (S-MF) observamos que estos valores variaron entre 1698.1 y 2217.7 °Cd. Por su lado Mwanamwenge *et al.* (1999) obtuvieron valores comprendidos entre 2317 y 2580 °Cd para el ciclo completo considerado a partir de la siembra.

Teniendo en cuenta el ciclo desde emergencia a madurez fisiológica, en nuestro experimento el dato promedio para todas las fechas de siembra fue de 1792.8 °Cd, algo más elevados que los publicados para este mismo cultivar, datos que variaron entre 609 y 1243 °Cd ($T_b = 0$ °C) para el ciclo completo desde emergencia hasta madurez en fechas otoñales, y entre 737 y 876 °Cd para fechas invernales en ensayos de campo realizados en Madrid (Ruíz-Ramos, 2003).

Cuando utilizamos la T_b de 1.7 °C para todo el ciclo, vemos que el TT acumulado en madurez fisiológica varía entre 1830.3 y 1526.4 °Cd para primera y quinta fecha, respectivamente. Al considerar T_b variable, la suma térmica alcanzada por el cultivo (**Tabla 11**) en madurez fisiológica osciló entre 1735.4 y 1519 °Cd para 1ª y 5ª fecha, respectivamente.

Se incluye una tabla con los valores promedio de duración en días de las distintas fases fenológicas (**Tabla 12**). Esto fue detallado en el punto 1.3.2.1.

Tabla 11. Sumas térmicas medias ($^{\circ}\text{Cd}$) de tres años de experimentos requeridas por las cinco fechas de siembra del cultivo de habas para completar los sucesivos subperiodos fenológicos (subp.), considerando diferentes las temperaturas base (TT_{var}) halladas para cada subperíodo fenológico (ver **Tabla 9**).

Fecha	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a
Subp.					
S-E	137.7 ± 11.1	182.3 ± 8.2	158.4 ± 10.2	163.7 ± 9.9	154.7 ± 4.2
E-F	605.7 ± 12.3	424.2 ± 13.2	515.2 ± 14.2	523.4 ± 14.1	481.6 ± 15.3
F-V	223.5 ± 14.2	177.2 ± 10.3	128.6 ± 1.2	163.5 ± 12.4	161.7 ± 10.6
V-MF	730.9 ± 13.0	899.1 ± 11.2	880.9 ± 9.3	805.6 ± 9.2	705.1 ± 11.5
S-MF	1735.4 ± 8.1	1724.0 ± 9.0	1699.4 ± 7.2	1666.5 ± 6.8	1519.0 ± 8.8

E-F: emergencia- floración; F-V: floración-formación de primera vaina; V-MF: vaina-madurez fisiológica; S-MF: ciclo completo, desde la siembra a la madurez fisiológica.

Tabla 12. Duración en días, promedio de los tres años de experimento, para los distintos subperiodos fenológicos de las cinco fechas de siembra de habas ensayadas, y su correspondiente desviación estándar.

	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a
Subp.					
S-E	19.7 ± 7.6	39.0 ± 7.9	29.3 ± 9.0	23.0 ± 8.7	13.3 ± 0.6
E-F	121.0 ± 12.3	75.3 ± 5.5	53.0 ± 7.8	39.3 ± 3.1	33.0 ± 2.6
F-V	29.3 ± 7.6	19.0 ± 6.9	11.3 ± 3.2	10.7 ± 4.0	10.7 ± 4.0
V-MF	72.3 ± 16.9	83.0 ± 11.8	73.0 ± 11.5	61.6 ± 5.5	56.3 ± 13.6
S-MF	228.7 ± 4.7	199.7 ± 1.5	150.3 ± 6.7	119.0 ± 10.1	99.7 ± 4.7

E-F: emergencia- floración; F-V: floración-formación de primera vaina; V-MF: vaina-madurez fisiológica; S-MF: ciclo completo, desde la siembra a la madurez fisiológica.

Para comparar las distintas metodologías de cuantificación del desarrollo, consideramos los valores promedio para cada uno de los subperíodos fenológicos considerados, el CV y la desviación estándar en días (Desvdías) (**Tabla 13**).

En los subperíodos S-E y E-F el menor CV y Desvdías lo presentaron los métodos de TT con temperatura base de 1.7 y variable (que coinciden en el valor de T_b empleado en las primeras fases de desarrollo del cultivo) mientras el mayor CV y Desvdías lo tuvo el método de días calendario.

En el subperíodo F-V se observó una fuerte reducción del CV y del Desvdías en el método de tiempo térmico con T_b variables, alcanzando un desvío de solamente 1.5 días. Lo mismo sucedió en el subperíodo V-MF, donde la suma térmica con T_b variable arrojó el menor CV y la menor desviación en días.

Por lo tanto, se pudo comprobar que la desviación estándar de los días calendario fue siempre mayor que la correspondiente a cualquier modelo de sumas térmicas para todos los subperíodos restantes analizados, lo que indicaría que cualquiera de los métodos estudiados predice con mayor precisión los eventos fenológicos que los días calendario. El método que presenta las menores desviaciones en días en la mayoría de los subperíodos es el de tiempo térmico con temperatura base variable, por lo que se recomendaría su uso para predecir la fenología del cultivo de haba.

Tabla 13. Tiempo medio requerido en tres años de experimentos para completar las sucesivas fases de las cinco fechas de siembra del cultivo de habas y respectivos Coeficientes de variabilidad (CV), desviación estandar (Desv.) y desviación estándar en días (Desvdías). Ecuaciones de escalas de tiempo empleadas: días calendario, D; tiempo térmico con temperatura base 0 °C para todo el ciclo (TT₀); tiempo térmico con temperatura base 1.7 °C para todo el ciclo (TT_{1.7}) y tiempo térmico con temperaturas variables (TT_{var}).

Fase\Tiempo	D (días)	TT₀ (°Cd)	TT_{1.7} (°Cd)	TT_{var} (°Cd)
S-E				
Media	24.9	201.3	159.4	159.4
Desv.	9.8	28.3	16.1	16.1
CV	39.3	14.1	10.1	10.1
Desvdías	9.8	3.5	2.5	2.5
E-F				
Media	64.3	615.9	510.0	510.0
Desv.	35.6	104.7	66.1	66.1
CV	55.3	17.0	12.9	12.9
Desvdías	35.6	10.9	8.3	8.3
F-V				
Media	16.2	212.2	184.5	170.9
Desv.	8.1	60.6	48.4	15.5
CV	50.3	28.6	26.2	9.1
Desvdías	8.1	4.6	4.2	1.5
V-MF				
Media	69.2	963.8	864.4	804.3
Desv.	10.5	107.2	91.5	60.8
CV	15.1	11.1	10.5	7.6
Desvdías	10.5	7.7	7.3	5.2
S-MF				
Media	159.5	1994.1	1720.6	1668.8
Desv.	54.1	198.6	116.2	34.4
CV	33.9	9.9	6.7	2.1
Desvdías	54.1	15.9	10.8	3.3

E-F: emergencia- floración; F-1V: floración-formación de primera vaina; 1V-VL: aparición de la primera vaina-vaina llena; VL-MF: vaina llena-madurez fisiológica; S-MF: ciclo completo, desde la emergencia a la madurez fisiológica.

1.3.3. Evolución de la producción de biomasa

En la **Figura 1** se muestra la evolución temporal de la acumulación de biomasa total aérea del haba para las distintas fechas de siembra a lo largo del ciclo del cultivo en función del tiempo térmico acumulado (TT_{var}). El mejor ajuste de los datos a una curva de crecimiento, para los tres años de cultivo, se logró con la ecuación de Richards (1959):

$$W(TT_{var}) = \frac{a}{(1 + e^{b-c*TT})^{1/d}} \quad \text{ec. 9}$$

Donde,

$W(t)$: peso de biomasa total en el tiempo térmico (TT_{var}), éste calculado con temperaturas basales variables según el subperíodo fenológico del cultivo (ver **Tabla 9**)

a : asíntota de la curva cuando $TT \rightarrow \infty$

b : coeficiente que regula la tasa en la cual la asíntota a es alcanzada

c : coeficiente igual a la tasa de crecimiento relativo a muy bajos valores de biomasa aérea

d : coeficiente alométrico, permite variaciones en la forma sigmoidea de la curva.

En la **Tabla 14** se pueden ver los coeficientes de dicha ecuación. Los mayores valores de biomasa se alcanzaron en la segunda y tercera fechas de siembra (**Fig. 1**). La ecuación de Richards consigue un buen ajuste y el coeficiente de correlación es alto para todas las fechas de siembra.

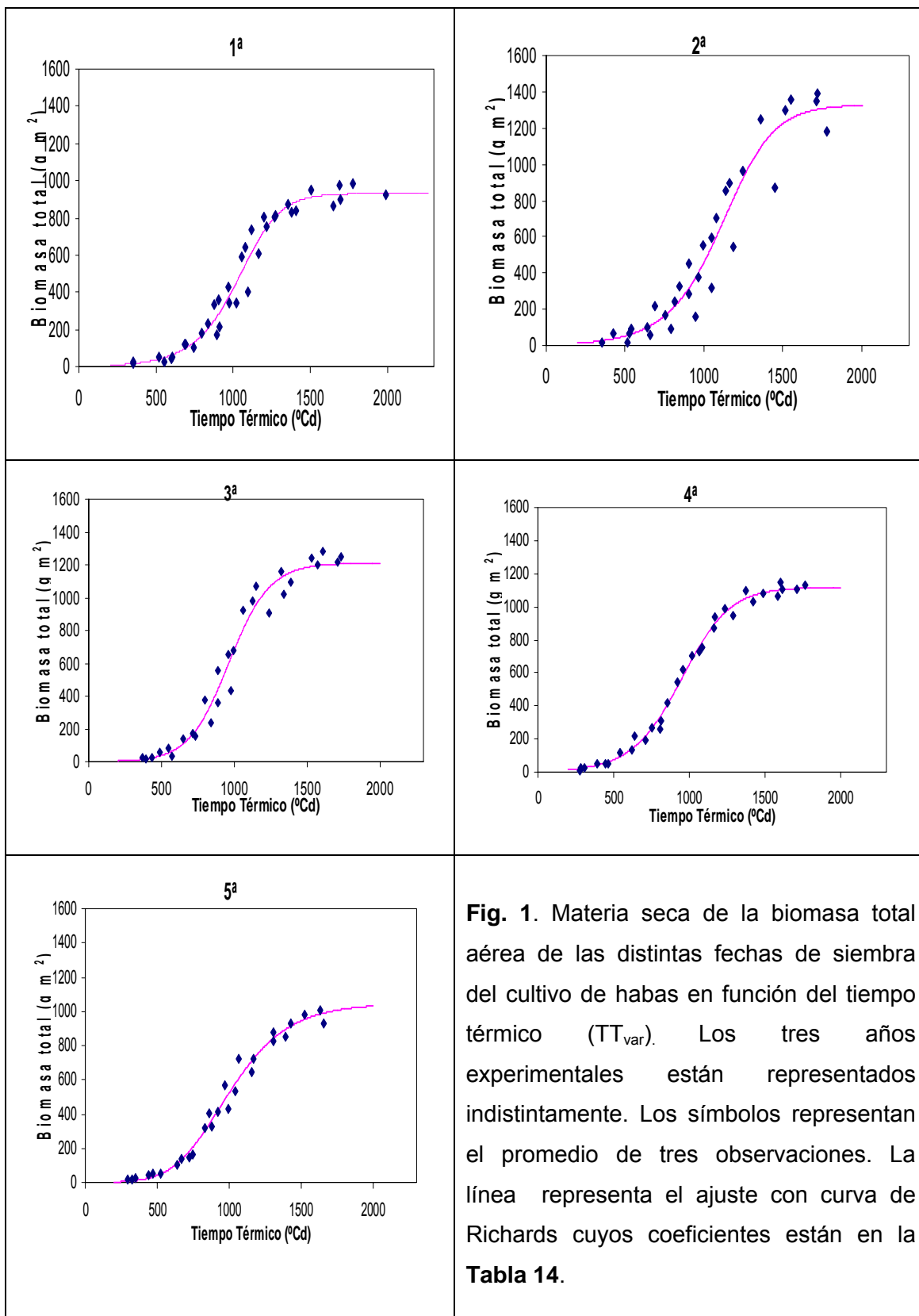


Fig. 1. Materia seca de la biomasa total aérea de las distintas fechas de siembra del cultivo de habas en función del tiempo térmico (TT_{var}). Los tres años experimentales están representados indistintamente. Los símbolos representan el promedio de tres observaciones. La línea representa el ajuste con curva de Richards cuyos coeficientes están en la **Tabla 14**.

Tabla 14. Coeficientes de la ecuación de Richards para el ajuste de acumulación temporal (TT_{var}) de biomasa total aérea (ver Fig. 1) para las cinco fechas de siembra de habas (datos de tres años de experimentación).

	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a
a:	931.3	1328.6	1210.8	1118.9	1044.8
b:	9.41	8.08	6.67	6.45	2.76
c:	0.00846	0.00677	0.00704	0.00656	0.00406
d:	1.608	1.461	0.921	1.189	0.349
r²:	0.94	0.91	0.99	0.99	0.99

La **Tabla 15** muestra la tasa de crecimiento del cultivo (TCC) para cada fecha de siembra, en distintos subperíodos fenológicos de cada uno de los años de experimento. En general, la TCC para cada fase fenológica siguió la marcha de la temperatura. Ésta parece haber sido la variable ambiental que más limitó el crecimiento, especialmente en las fechas de siembra tempranas.

La tasa de crecimiento del cultivo (TCC) para el subperiodo E-F, promedio de los tres años de experimento, varió entre 0,9 y 5.0 g m⁻² día⁻¹ para la primera y la cuarta fecha, respectivamente, con valores extremos de 0.8 y 6.4 g m⁻² día⁻¹ (**Tabla 15**). La TCC aumenta con la temperatura media diaria (**Tabla 7**) y la radiación PAR incidente del subperíodo, por lo que aumenta a medida que se atrasa la fecha de siembra. No obstante, a pesar del aumento de la temperatura, se observó un estancamiento o incluso disminución en la TCC en la quinta fecha, con respecto a la cuarta ya que en esta fecha la radiación está en disminución.

En la fase F-V, al igual que en la anterior, fue la cuarta fecha de siembra la que presentó los más altos valores de TCC, y la segunda fecha, los más bajos. Los valores promedios variaron entre 4.8 y 17.2 g m⁻² día⁻¹. Los valores extremos, 2.7 y 20.9 g m⁻² día⁻¹, se alcanzaron en la segunda fecha de siembra del primer año de experimento y la cuarta fecha de siembra del segundo año de experimentación, respectivamente (**Tabla 15**).

Tabla 15. Tasa de crecimiento del cultivo (TCC; $\text{g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) en los cuatro subperíodos fenológicos estudiados para las cinco fechas de siembra de habas de los tres experimentos. Se presenta el valor promedio de cada año (tres repeticiones), así como el promedio total de los tres años para cada subperíodo fenológico.

fecha	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a
Subp. y año					
E-F					
2004/05	0.8	0.8	2.9	5.2	4.0
2005/06	0.9	1.0	3.2	6.4	4.0
2006/07	1.1	2.4	2.6	3.4	3.4
Media	0.9 c	1.4 c	2.9 b	5.0 a	3.8 b
F-V					
2004/05	5.2	2.7	16.5	14.8	14.0
2005/06	8.8	4.3	18.7	20.9	15.8
2006/07	13.5	7.3	13.2	15.8	16.5
Media	9.2 b	4.8 b	16.1 a	17.2 a	15.4 a
V-MF					
2004/05	9.3	17.5	16.6	16.0	17.1
2005/06	8.0	11.0	11.4	8.9	11.6
2006/07	6.0	16.8	13.3	14.3	14.9
Media	7.8 b	15.1 a	13.8 a	13.1 a	14.5 a

E-F: emergencia- floración; F-V: floración-inicio de vainas; V-MF: inicio de vainas-madurez fisiológica.

Para cada subperíodo fenológico, la misma letra en la línea, significa que no existen diferencias significativas por el test de Duncan ($p < 0.05$).

En el subperíodo fenológico E-F es la 4^a fecha de siembra la que muestra los valores más altos de TCC, seguidos de las 5^a y 3^a fechas de siembra. Los valores más bajos corresponden a las 1^a y 2^a fechas.

En el subperíodo F-V se observan dos grupos en los que el promedio no difiere significativamente, uno formado por las 3^a, 4^a y 5^a fechas, con los valores más altos y otro grupo formado por las 1^a y 2^a fechas, los que también en esta fase presentan los valores más bajos.

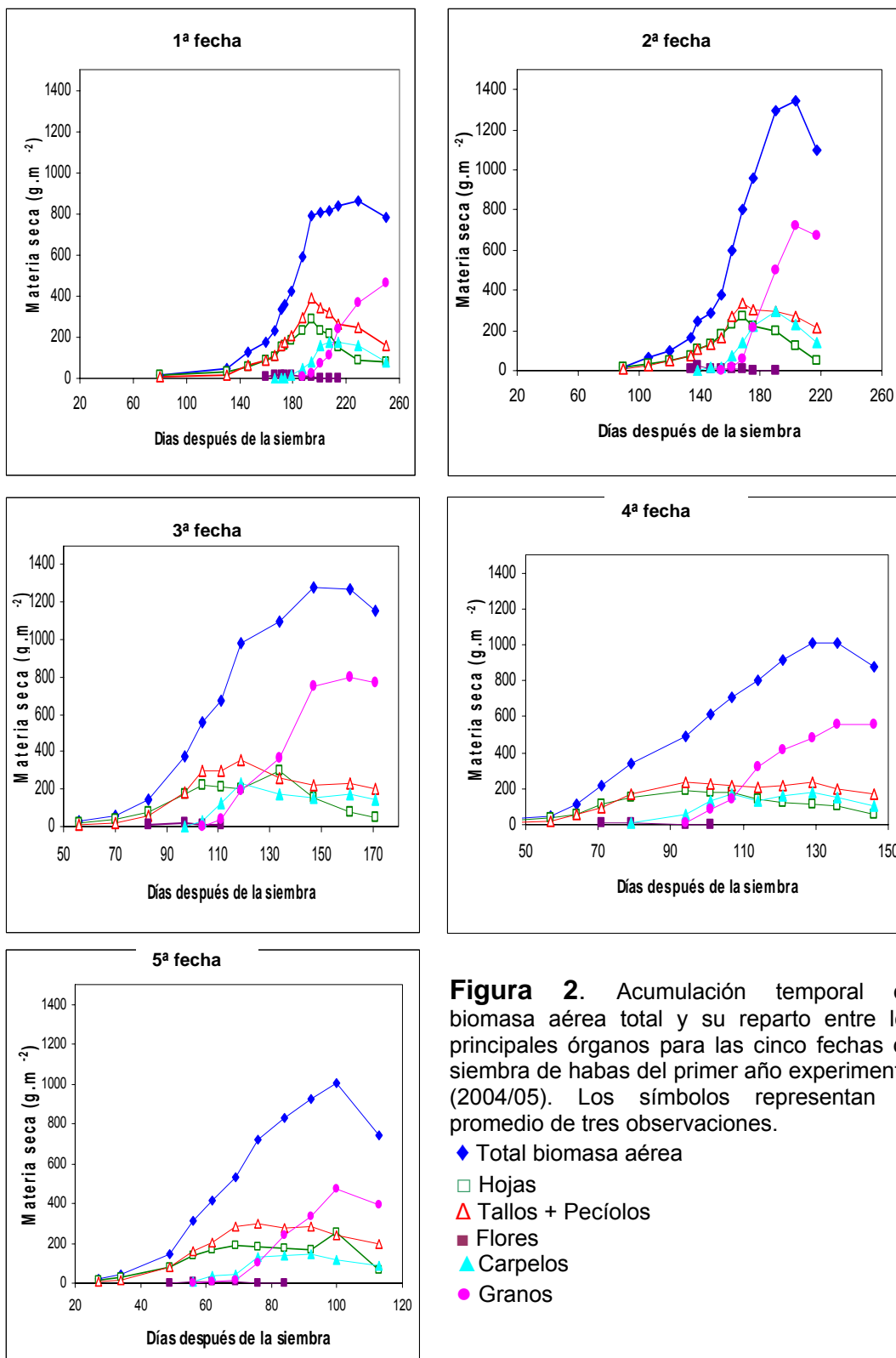
En el subperíodo V-MF, fue la primera fecha de siembra la que presentó los valores más bajos de TCC (media de tres años: $7.8 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), mientras que los más altos (media de tres años: $15.1 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) se registraron en la segunda fecha de siembra, si bien no difiere significativamente de los valores de las fechas 3^a, 4^a y 5^a.

En general, se puede observar que es la 1ª fecha de siembra la que presenta los valores más bajos de TCC mientras la 4ª fecha es la que presenta los más altos valores de TCC para todos los subperíodos analizados. Las siembras de otoño (dos primeras fechas) presentaron bajas TCC al inicio del ciclo, además de un largo período entre siembra y emergencia. Para este mismo cultivar se han publicado valores muy altos de TCC, hasta de $25 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ en condiciones de alta temperatura y suministro de agua no limitante (Mínguez *et al.*, 1993).

En la **Figura 2** se puede ver la acumulación temporal de biomasa aérea total de las cinco fechas de siembra del primer año experimental (2004/05), así como su distribución entre los principales órganos.

Observando el coeficiente de reparto de la biomasa vegetativa entre (a) hojas y (b) tallos respectivamente (**Figura 3**) (la pendiente de la regresión indica el coeficiente de reparto), vemos que a pesar de no encontrarse diferencias significativas, las fechas otoño-invernales (3 primeras fechas) muestran mayor partición hacia tallos que hacia hojas que las primaverales (4ª y 5ª). En consecuencia estas fechas presentan un menor porcentaje de biomasa vegetativa en forma de tallos. Algunos autores han mostrado que el peso de los tallos está directamente relacionado con el rendimiento. Nachi y LeGuen (1996) han mostrado que dicho valor se relaciona positivamente con el número de vainas por m^2 , pero esta relación no pudo ser confirmada para todas las fechas de siembra en nuestro experimento.

Considerando el coeficiente de reparto de la biomasa aérea entre tallos y hojas vemos que para el conjunto de fechas de siembra, antes de la floración, alrededor del 48% de la biomasa aérea fue translocada hacia los tallos y el 52% restante, hacia las hojas. Entre floración y formación de la primera vaina, esta fracción decreció en forma variable para las distintas fechas de siembra. Pero como el número de nudos y hojas continuó incrementándose durante este período, al tratarse de un cultivar de crecimiento indeterminado, no se observó fase de meseta en la acumulación de biomasa de hojas y sólo se hizo evidente



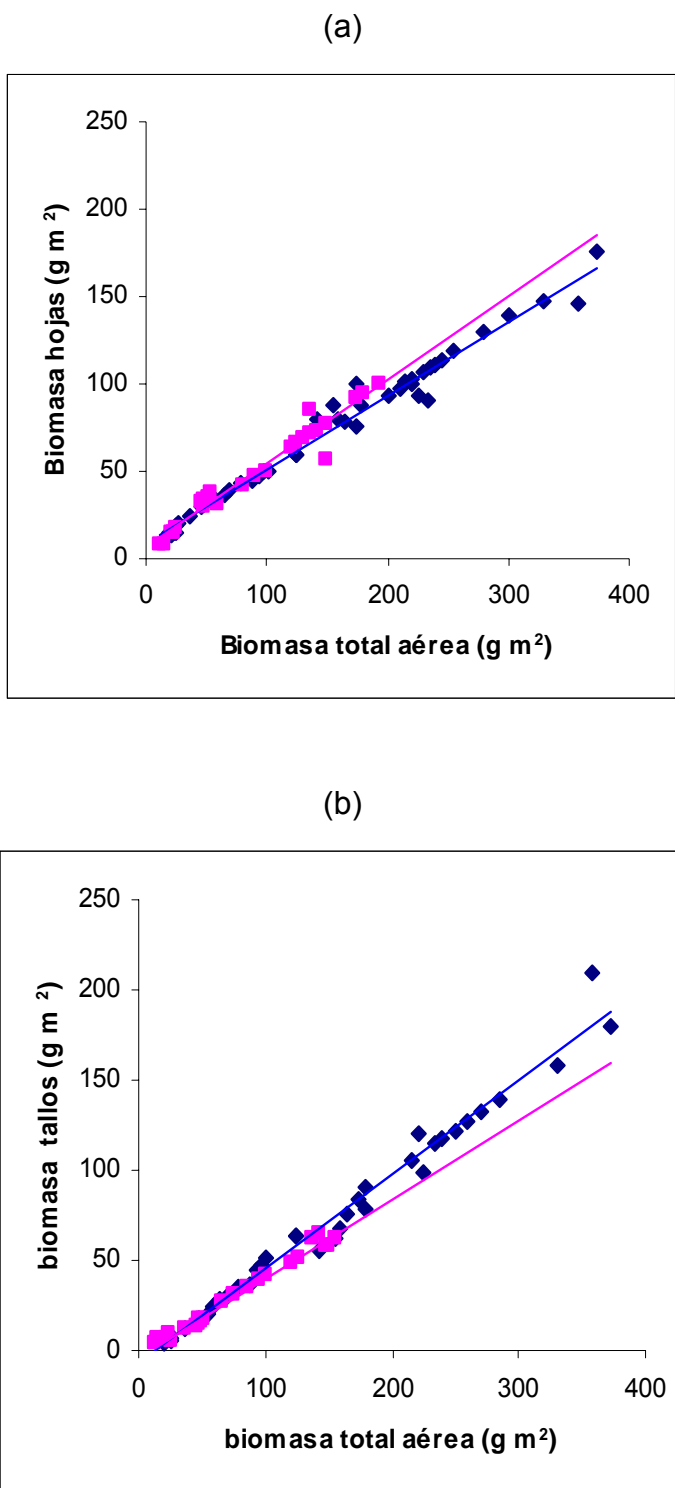


Figura 3. Relación entre biomasa foliar (limbos) (a) y biomasa de tallos + pecíolos (b) con la biomasa total aérea del cultivo de habas en la fase vegetativa.

◆ fechas de siembra otoño-invernales;
 ■ fechas de siembra de primavera. Los tres años experimentales están representados indistintamente.

Los símbolos representan el promedio de tres observaciones.

(a) fechas de siembra otoño-invernales (1^a, 2^a y 3^a):
 $y = 0.47x$, $r^2 = 0.95$;
 fechas de siembra primaverales (4^a y 5^a): $y = 0.52x$; $r^2 = 0.97$

(b) fechas de siembra otoño-invernales: $y = 0.53x$, $r^2 = 0.98$;
 fechas de siembra primaverales: $y = 0.48x$; $r^2 = 0.98$

ésta al principio de la fase de formación de vainas (V-VL). Durante esta fase, a pesar de que las plantas continúan emitiendo hojas, la meseta en la biomasa foliar se produce por el aumento de la tasa de senescencia que llega a compensar y superar el crecimiento de hojas.

En la **Tabla 16** se muestran los valores promedio de materia seca total aérea (MS) de los tres años de experimento, en tres estadios fenológicos: floración (MS(F)), inicio de vainas (MS(V)) y madurez fisiológica (MS(MF)).

La materia seca en floración disminuye a medida que se atrasa la fecha de siembra. Los valores variaron entre 183.7 g m^{-2} y 115.5 g m^{-2} para la primera y la última fecha, respectivamente.

En el estadio de inicio de vainas continúa siendo la primera fecha de siembra la que presenta mayor biomasa aérea. Ese estadio es considerado el mejor momento de corte del haba destinada a ensilado ya que se combina una alta cantidad de materia seca con buenas cualidades nutricionales (De la Roza *et al.*, 2004).

La primera fecha de siembra, a pesar de ser la que menor biomasa aérea presentó en madurez fisiológica, fue la que más acumuló en el estadio de inicio de vainas, que se produjo, por término medio, 170 días después de la siembra (alrededor del 20 de abril). Esto indica que puede ser la de mayor interés para un aprovechamiento forrajero destinado a ensilado en rotación con el maíz. Además, la fecha de corte en estadio de inicio de vainas (en torno al 20 de abril) sería compatible con la fecha de siembra del maíz forrajero que se recomienda en la actualidad para la zona de Lugo (5-15 de mayo). De todos modos, para ello sería recomendable recurrir a cultivares más resistentes a las enfermedades fúngicas, ya que la primera fecha de siembra muestra predisposición a contraerlas.

Tabla 16. Valores promedio de biomasa aérea total, de los tres años de experimento de habas, en tres estadios fenológicos: floración (MS (F)), inicio de vainas (MS(V)), madurez fisiológica (MS(MF)) y de madurez de cosecha (MS (cos.))

	MS(F) (g m⁻²)	MS(V) (g m⁻²)	MS(MF) (g m⁻²)	MS (cos.)
1 ^a	183.7 a	419.9 a	916.0 c	842.1 bc
2 ^a	163.9 b	239.7 b	1309.9 a	1088.8 a
3 ^a	131.7 c	262.8 ab	1245.7 a	1114.5 a
4 ^a	122.2 d	366.2 ab	1086.6 b	900.1 b
5 ^a	115.5 e	271.6 ab	993.6 bc	745.3 c

*valores en las columnas seguidos de la misma letra, no difieren entre sí por el test de Duncan ($P < 0.05$)

Comparando los valores de biomasa aérea en los estadios de madurez fisiológica con los de cosecha, para cada fecha de siembra (**Tabla 15**), vemos que la disminución fue de 8.1%, 16.9%, 10.5%, 17.2% y 24.8% de la primera a la quinta fecha. Esta disminución en biomasa se debe a que las hojas muertas no fueron recogidas del suelo y además, el muestreo de cosecha se realizó en una superficie mayor; también hay que tener en cuenta que durante este período, la respiración puede superar a la fotosíntesis bruta. En estas dos fases en que se realizaron muestreos, la tercera y la segunda fechas de siembra no muestran diferencias significativas entre sí y presentan los más altos valores, seguidos de la cuarta fecha.

En promedio, las fechas otoño-invernales superan en biomasa a las primaverales en un 10% en madurez fisiológica y en un 19% en madurez de cosecha. Esto muestra la mayor productividad en biomasa a final de ciclo de las fechas otoño-invernales con respecto a las primaverales.

1.3.4. Evolución del índice de área foliar

En la **Figura 4** se muestra la evolución temporal del índice de área foliar (IAF) del haba para las distintas fechas de siembra a lo largo del ciclo del cultivo en función del tiempo térmico acumulado considerando temperaturas basales variables para los distintos subperíodos fenológicos (TT_{var}). El IAF de los cinco tratamientos en función del tiempo térmico pudo ser representado de modo adecuado mediante ajuste ($r^2 \geq 0.97$; **Tabla 17**) de la ecuación de Gauss (Ec. 10). Los parámetros para los cinco tratamientos medios, en los tres años de experimento, pueden verse en la **Tabla 17**.

Las fechas de siembra otoño-invernales (1^a, 2^a y 3^a) alcanzaron valores más altos de IAF que las primaverales (4^a y 5^a). Entre las otoño-invernales, fue la tercera fecha de siembra la que logró el valor de IAF más alto y además, la que comenzó la etapa de llenado de grano con mayor superficie foliar.

$$IAF (TT_{var}) = A \cdot e^{\frac{-(t-b)^2}{2 \cdot c^2}} \quad \text{ec. 10}$$

Donde

IAF: índice de área foliar

TT_{var} : tiempo térmico (°Cd) calculado con temperaturas basales variables según el subperíodo (ver **Tabla 9**)

A: índice de área foliar máximo

b: Tiempo térmico en el que se produce el IAF máximo

c: coeficiente de dispersión, indica apertura de la curva

En la **Tabla 18** se muestran los valores de IAF máximo (IAF_{max}) alcanzados por las distintas fechas de siembra y la duración de dicha superficie foliar (DAF). Se puede observar que la DAF disminuye a medida que se retrasa la siembra. Por otro lado, esta disminución es atribuible esencialmente al acortamiento del ciclo.

Si bien la fecha de siembra invernal (tercera fecha) es la que presenta el valor de IAF más alto, su duración (DAF) no difiere significativamente de la primera y segunda fecha de siembra. Cuando comparamos en promedio las fechas otoño-invernales (1^a, 2^a y 3^a fechas de siembra) con las primaverales (4^a y 5^a fechas de siembra) vemos la disminución que sufre tanto de IAF_{max} alcanzado como de DAF (17% y 36% respectivamente).

Algunos autores han establecido que la acumulación total de biomasa y el rendimiento son función principalmente de la DAF (Mínguez *et al.*, 1993; De Costa *et al.*, 1997). Sin embargo en nuestro caso, es el IAF_{max} el que indica la mejor relación positiva con la acumulación de materia seca.

En nuestro experimento, tanto el máximo rendimiento en grano como en biomasa se lograron en la tercera fecha de siembra, que presenta una DAF promedio de 311.3 días.

En trabajos realizados con este mismo cv. en Córdoba bajo condiciones de seco y de regadío, se obtuvieron valores de DAF máximos entre 400 y 600 días, alcanzándose un rendimiento de 6000 kg ha⁻¹ con valores de DAF algo mayores a 300 días (Mínguez *et al.*, 1993). En dicho experimento se mostró que incrementos en DAF por encima del umbral de 300 días, no estaban asociados con un mayor rendimiento en grano, sino sólo con una mayor cantidad de biomasa aérea total en cosecha (Mínguez *et al.*, 1993; Sau y Mínguez, 2000).

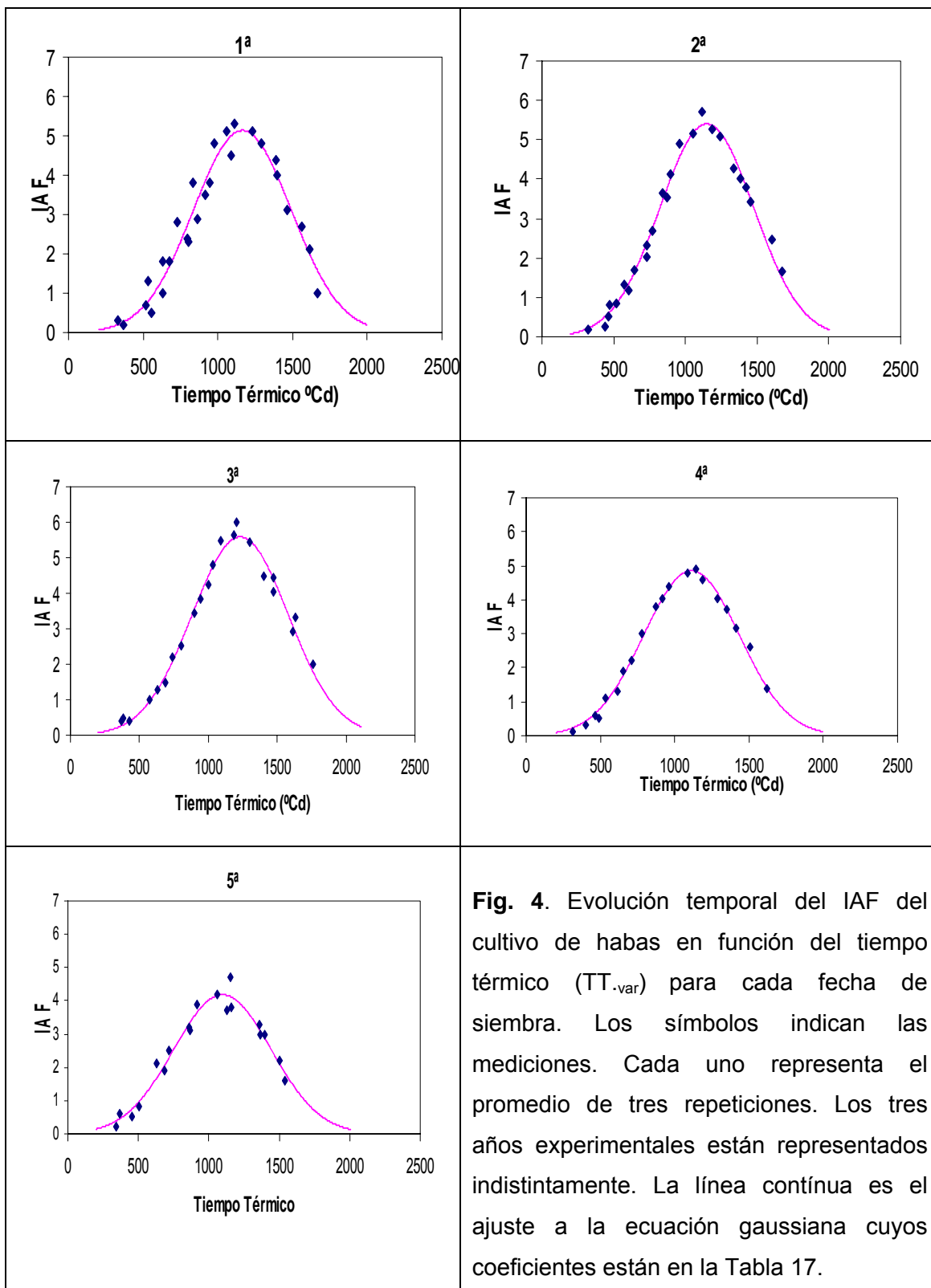


Fig. 4. Evolución temporal del IAF del cultivo de habas en función del tiempo térmico (TT_{var}) para cada fecha de siembra. Los símbolos indican las mediciones. Cada uno representa el promedio de tres repeticiones. Los tres años experimentales están representados indistintamente. La línea continua es el ajuste a la ecuación gaussiana cuyos coeficientes están en la Tabla 17.

Tabla 17. Coeficientes de la ecuación gaussiana para el ajuste de la evolución temporal del IAF (ver Fig. 4) de las cinco fechas de siembra de habas (datos de tres años de experimentación).

	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a
A:	5.137	5.405	5.588	4.853	4.181
b:	1164	1150	1232	1113	1097
c:	327.4	326.8	349.6	324.0	345.7
r²:	0.97	0.99	0.99	0.99	0.98

Tabla 18. Valores de índice de área foliar máximo (IAF_{max}) y duración del área foliar (DAF; días) para cada fecha de siembra de habas, promedio de los tres años de experimento.

Fecha de Siembra	IAF _{max}	DAF (días)
1 ^a	5.12 ab	366.1 a
2 ^a	5.13 ab	316.9 a
3 ^a	5.41 a	311.3 a
4 ^a	4.62 bc	253.2 b
5 ^a	4.08 c	172.1 c

*valores en las columnas seguidos de la misma letra, no difieren entre sí por el test de Duncan (P< 0.05)

1.3.5. Intercepción y eficiencia de utilización de la radiación fotosintéticamente activa (EUR)

En este punto serán analizadas por medio del método de la radiación, las modificaciones que ocurren en los mecanismos de captura y utilización de la radiación por el cultivo de haba en las distintas fechas de siembra.

Con la densidad de siembra empleada en este experimento, el haba en todas sus fechas de siembra logra superar el 95 % de intercepción de PAR. En

todas las fechas de siembra, esto sucede alrededor del inicio de formación de vainas.

La EUR de cada fecha de siembra fue calculada por dos metodologías (**Tabla 19**). La primera mediante regresiones lineales entre los valores de materia seca aérea producida (acumulada) a lo largo del ciclo hasta madurez fisiológica y la radiación PAR diaria acumulada interceptada (IPARac) por el cultivo (EURac). La segunda, calculando el crecimiento del cultivo entre dos muestreos (CC), es decir el incremento de la biomasa entre dos muestreos consecutivos y dividiéndolo por la radiación interceptada durante ese período (EUR_{CC}). En los dos casos se realizó el análisis de la comparación de las líneas de regresión que comprendían todos los puntos experimentales correspondientes a los tres años de experimento: 1ª fecha, 81 puntos; 2ª fecha 69 puntos; 3ª fecha, 59 puntos; 4ª fecha, 64 puntos y 5ª fecha 54 puntos.

La pendiente de la regresión indica la eficiencia de utilización de la radiación (EUR) estacional para el cultivar 'Alameda' (ver 1.2.6).

Los valores promedio de EUR encontrados en este experimento variaron entre 1.68 - 1.70 y 0.98 - 0.92 g MJ⁻¹(PAR) dependiendo de la metodología de cálculo utilizada (**Tabla 19**). Los valores más altos corresponden a la 3ª fecha de siembra y los más bajos a la 1ª. Mínguez *et al.* (1993) obtuvieron, para este mismo cultivar en condiciones mediterráneas, una EUR de 1.79 g MJ⁻¹(PAR). Otros autores han registrado valores de 1.3 a 1.4 g MJ⁻¹(PAR) (Husain *et al.* 1988; Madeira *et al.*, 1988).

Las fechas de siembra más tempranas interceptan mayor cantidad de PAR hasta madurez fisiológica (IPARac, **Tabla 19**), siendo las fechas de siembra primaverales las que tienen los valores más bajos de IPARac. La 3ª y 2ª fechas de siembra son las que presentan los más altos valores de EUR, independientemente de la metodología empleada (**Tabla 19**) y, también, las fechas más productivas en biomasa total en madurez fisiológica (**Tabla 16**) y en materia seca de granos en cosecha (**Tabla 20**). Independientemente de la metodología empleada, los valores más bajos de EUR corresponden a la primera fecha de siembra, seguidos de la quinta y cuarta fecha. En el presente

estudio, al aplicar el test de Bartlett a los datos de EUR_{CC}, se obtuvo un valor de p mayor de 0.05, lo que demuestra que no existe diferencia significativa entre la varianza de los tratamientos, si bien los datos promedios mantienen la misma tendencia que los datos de EUR_{ac}.

La menor varianza de EUR_{ac}, cuando se compara con la de EUR_{cc}, se debe probablemente a que los valores de IPAR_{ac} y de biomasa acumulada no son verdaderamente independientes (Demetriades-Shaw et al., 1992). Mitchell et al. (1998) y Lindquist et al. (2005) también llegaron a la conclusión de que el tradicional método acumulativo para determinar EUR tiende a dar falsa confianza en el valor resultante y enmascara la variación de la eficiencia de utilización de la radiación con el tiempo.

A pesar de que es la primera fecha de siembra la que presenta los mayores valores de IPAR_{ac} ya que ofrece los valores más altos de DAF (**Tabla 18**), su EUR fue la más baja de las encontradas en este experimento porque el cultivo se ve sometido a temperaturas subóptimas y tiene predisposición a padecer enfermedades fúngicas, que provocan la menor acumulación de materia seca de todas las fechas de siembra.

Comparando los valores promedios de IPAR_{ac} y EUR_{ac} de la segunda y tercera fecha, vemos que la segunda intercepta un 5.91% más que la tercera fecha de siembra, sin embargo, la EUR_{ac} de la segunda es un 1.2% menor que la tercera. En este caso se observa una compensación de los mecanismos de interceptación y de eficiencia en la utilización de la radiación. La 3^a fecha de siembra (mediados de febrero) aunque presente una cierta merma en su capacidad de interceptar radiación, compensa esa pérdida con un aumento de EUR que indica una mayor eficacia en el sistema fotosintético, lo que conlleva que estas fechas de siembra no muestren diferencias significativas en la producción de biomasa aérea en madurez fisiológica.

La cuarta y quinta fechas de siembra presentan valores inferiores a la segunda y tercera fechas de siembra, tanto en lo que se refiere a interceptación de PAR como a EUR.

Comparando los valores de IPARac y de EURac de las fechas primaverales (promedio de las dos últimas fechas) con respecto a la fecha de siembra de invierno (mediados de febrero; 3^a), observamos una disminución de la captura de radiación -tanto morfológica como fisiológica- ya que existe 8 % menos de PAR interceptada durante todo el ciclo y 8.9 % menos de EURac. Esta disminución en los valores de captura, tanto morfológicos como fisiológicos, produjo la disminución en el rendimiento del cultivo en las siembras primaverales.

Tabla 19. Radiación fotosintéticamente activa (PAR) interceptada acumulada hasta madurez fisiológica (IPARac) de las cinco fechas de siembra de habas, así como eficiencia de utilización de la radiación (EURac y EURcc), IAF crítico (IAF_c) y coeficiente de extinción de PAR (*k*) para todas las fechas de siembra desde emergencia hasta madurez fisiológica. Los datos son promedio de los tres años de experimento.

Fechas de siembra	IPARac ^{*1} (MJ m⁻²)	EURac ^{*2a} (g MJ⁻¹)	EURcc (g MJ⁻¹)	IAF_c ^{*1}	<i>k</i> ^{*2b}
1^a	930.1 a	0.98 c	0.92	3.30 b	0.79 a
2^a	788.1 b	1.66 a	1.65	3.34 b	0.80 a
3^a	741.5 b	1.68 a	1.70	3.36 b	0.81 a
4^a	701.0 bc	1.55 b	1.44	4.22 a	0.65 b
5^a	662.4 c	1.50 b	1.40	4.30 a	0.63 b

^{*1}valores en las columnas seguidas de la misma letra, no difieren entre sí por el test de Duncan ($p < 0.05$).

^{*2}valores en las columnas seguidas de la misma letra, no difieren entre sí por el test *t* ($p < 0.05$)

^a: LSD = 0.0883; ^b: LSD = 0.0451

Los altos valores de EUR registrados por la 2^a y 3^a fechas de siembra, se debieron probablemente a que las temperaturas comenzaban a ser cercanas al óptimo de la fotosíntesis neta de la especie. El promedio de temperatura desde

emergencia a madurez fisiológica fue $11.8\text{ °C} \pm 0.95$ y $14.6\text{ °C} \pm 1.1$ para la 2ª y 3ª fecha de siembra, respectivamente. La 1ª fecha de siembra presentó el valor más bajo de EUR, ya que está asociada a temperaturas subóptimas: promedio de temperatura de emergencia a madurez fisiológica de $9.6\text{ °C} \pm 0.21$. Finalmente, es probable que la 4ª y 5ª fechas de siembra crecieran bajo la influencia de temperaturas más altas que el óptimo para la fotosíntesis neta, especialmente durante el período de llenado de grano (temperatura promedio para el ciclo del cultivo: $16.8\text{ °C} \pm 1.3$ y $18.0\text{ °C} \pm 1.5$ para las fechas 4ª y 5ª).

La **Tabla 19** recoge también los valores de IAF crítico (IAF_c) y el coeficiente de extinción (k) para cada fecha de siembra obtenidos mediante la ecuación de Monsi y Saeki (1953). Entre los valores de IAF_c se diferencian dos grupos: uno formado por las tres primeras fechas de siembra (otoño-invernales) y otro por las dos últimas fechas de siembra (primaverales). En el primer grupo, el IAF_c fue algo superior a 3, mientras que en el segundo estos valores son superiores a 4, indicando una tendencia a una estructura de dosel más erecto en fechas de siembra tardías. Valores cercanos a 5 de IAF_c fueron encontrados por Mínguez *et al.* (1993) para este mismo cultivar en Córdoba.

En la Fig 5 se puede ver la relación entre IAF y la fracción de PAR interceptada. Además se indican, por una parte, los valores de k promedio para las fechas de siembra consideradas conjuntamente según las estaciones. Es decir por un lado las fechas de siembra otoño-invernales y por otro, las fechas de siembra primaverales.

Los valores hallados de k , agrupados por fechas otoño-invernales y primaverales, vienen a confirmar las tendencias del IAF_c , ya que los valores más altos corresponden a las fechas otoño-invernales (3 primeras fechas) y los más bajos a las siembras de primavera (2 últimas fechas). Estos valores coinciden con los publicados por Turpin *et al.*, (2002) quienes hallaron valores entre 0.53 y 0.85. El valor medio de k para todas las fechas de siembra fue de 0.71.

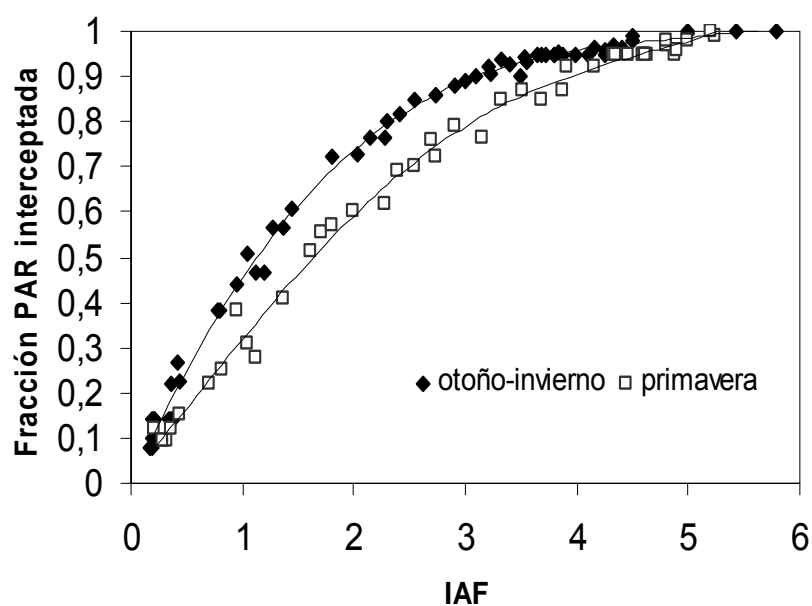


Fig. 5. Relación entre IAF y la fracción de PAR interceptada por el haba en todas las fechas de siembra de los tres años experimentales:

$$y = 1 - \text{Exp}(0.71 \cdot \text{IAF}), n = 95;$$

$$r^2 = 0.99$$

Fechas otoño-invernales (las tres primeras fechas de siembra):

$$y = 1 - \text{Exp}(0.83 \cdot \text{IAF}), n = 59; r^2 = 0.99$$

Fechas primaverales (las dos últimas fechas de siembra):

$$y = 1 - \text{Exp}(0.62 \cdot X), n = 36; r^2 = 0.98$$

Cada punto representa la media de tres mediciones. Todos los datos experimentales de los tres años de ensayo están representados. Las líneas corresponden a las dos ecuaciones anteriores.

1.3.6. Componentes del rendimiento

En la **Tabla 20** se muestra el promedio de rendimiento y sus componentes obtenidos para las cinco fechas de siembra en los tres años experimentales. Considerando el rendimiento de granos, fue la tercera fecha de siembra, la que presentó el mayor valor, con un dato medio para los tres años de experimento de 7733 kg ha^{-1} , siguiéndole la segunda fecha de siembra con 6738 kg ha^{-1} y la cuarta con 5466 kg ha^{-1} (**Tabla 20**).

Tabla 20. Rendimiento medio de grano (Rendim.; media de tres años de ensayo) y sus componentes para las cinco fechas de siembra del cultivo de haba: peso de 1000 granos (P1000), número de vainas por m^2 (Vai m^{-2}), número de semillas por m^2 (Sem m^{-2}), número de semillas por vaina o legumbre (Sem vai $^{-1}$) e índice de cosecha (IC).

Fecha de Siembra	Rendim. (g m^{-2})	P1000 (g)	Vai m^{-2} (nº)	Sem vai $^{-1}$ (nº)	Sem m^{-2} (nº)	IC (%)
1 ^a	428.1 d	954.3 a	207.7 d	2.16 bc	448.6 d	50.8 b
2 ^a	673.8 b	999.6 a	307.8 b	2.19 bc	674.1 b	61.8 a
3 ^a	773.3 a	975.3 a	366.5 a	2.11 c	754.2 a	67.6 a
4 ^a	546.6 c	799.3 b	266.8 c	2.53 a	683.9 b	60.7 a
5 ^a	383.1 d	708.4 c	228.2 d	2.37 ab	540.8 c	51.4 b

* valores en las columnas, seguidos de la misma letra no difieren entre sí por el test de Duncan ($P < 0,05$).

No existen diferencias significativas en el rendimiento de la primera y quinta fechas de siembra, que ofrecen los rendimientos más bajos, 4281 kg ha^{-1} y 3831 kg ha^{-1} respectivamente. La 5^a fecha obtuvo el menor rendimiento debido a un importante acortamiento del ciclo del cultivo lo que produjo una disminución en la captura de la radiación, asociada a menores valores de EUR. La disminución en el rendimiento en granos entre el tratamiento más

productivo (siembra de invierno; 3ª fecha) y el menos productivo (la última fecha de siembra en primavera) fue del 50.5 %.

Considerando el número de vainas por m² es la tercera fecha de siembra (mediados de febrero) la que muestra los más altos valores, seguido de la 2ª fecha. No se observan diferencias significativas entre 1ª y 5ª fechas, las de valores más bajos (**Tabla 20**).

En el número de semillas por m² se diferencia significativamente la 3ª fecha de siembra, pero no existen diferencias significativas entre la segunda y cuarta fechas de siembra. Sigue después la 5ª y por último la 1ª fecha que es la que presenta menor número semillas por m².

Con respecto al peso medio de granos, los valores más altos corresponden a las fechas otoño invernales (las tres primeras) que no muestran entre sí diferencias significativas, seguidos de las fechas 4ª y 5ª. Las siembras de primavera presentan granos más livianos que las de otoño-invierno.

En cuanto al número de semillas por vaina, la 4ª fecha muestra los valores más altos, junto con la 5ª, siendo los más bajos los de la 3ª fecha (**Tabla 20**). Son por lo tanto las siembras de primavera las que muestran una tendencia a tener los mayores valores, lo que indica que es uno de los componentes del rendimiento que condiciona en forma negativa el rendimiento final del cultivo.

En esta experiencia, las diferencias en el peso de las mil semillas entre las fechas de siembra otoño-invernales (3 primeras) y las de primavera (2 últimas), indican una variación en el número de los destinos reproductivos. La primera fecha de siembra, en la que este componente del rendimiento es elevado (**Tabla 20**), no logró compensar la gran diferencia en el número de vainas existentes con las otras fechas de siembra. Las dos últimas fechas de siembra, muestran una reducción tanto en el número de vainas por unidad de superficie como en el peso de sus semillas, componentes que disminuyen significativamente al atrasar las siembras de primavera. Otros autores encontraron una variación en el peso de las semillas dependiendo de la fecha de siembra (Poulain y Connén, 1992). El atraso en la fecha de siembra produce una reducción en el peso medio de las semillas, debido principalmente a una

disminución del tamaño de las mismas en las vainas de los nudos más cercanos al ápice de las plantas; por el contrario, en las fechas de siembra tempranas el tamaño es más uniforme en toda la planta (Adisawanto y Knight, 1997).

En cuanto al índice de cosecha (IC), existen dos grupos en los cuales la media no es significativamente diferente una de la otra (**Tabla 20**). El primer grupo está formado por las fechas 2^a, 3^a y 4^a que tienen los valores más altos de IC, entre los que se destaca el valor de 67.6% de la 3^a, mientras el otro grupo, formado por la 1^a y la 5^a, muestran un IC más bajo. Algunos trabajos (Sinha, 1978; Coelho y Pinto, 1989; Pilbean y Hebblethwaite, 1990; Katyar y Singh, 1990) indican que el límite superior del IC para haba es próximo a 50%. Éste valor es el que se encontró para las fechas de siembra menos productivas en semillas, es decir la 1^a y 5^a fechas de siembra. Los valores de IC encontrados en nuestro ensayo fueron un poco más altos que los citados por Loss *et al.*, (1997) y Sau (1989): (33-66%).

Cuando comparamos los resultados encontrados en nuestro ensayo (Lugo) con los obtenidos en Córdoba por Sau y Mínguez (2000) para una fecha de siembra de 24 de diciembre, la cual se aproxima a nuestra segunda fecha de siembra, podemos ver que en Lugo el peso de las semillas y el índice de cosecha son más altos (6.8% y 14.7% más, respectivamente). En Córdoba, sin embargo, fue mayor el número de vainas por unidad de superficie, lográndose un rendimiento en grano de 3% por debajo de los obtenidos en Lugo para una fecha de siembra similar.

Es probable que el aumento de la densidad de siembra en las fechas primaverales lograra compensar, por lo menos en parte, la disminución en el rendimiento en grano provocado por el acortamiento del ciclo. Sería interesante estudiar los componentes de rendimiento del haba con aumento en la densidad de siembra en las fechas de primavera.

1.3.7. Comparación de la primera fecha de siembra de 'Alameda' con otras leguminosas

En las **Tablas 21 y 22** podemos observar las fechas en que se alcanzan las fases fenológicas de los cultivos y la duración en días de los subperíodos evaluados.

Considerando el ciclo completo, los valores variaron entre 217 días para VN (*Vicia narbonensis* L.) y 268 días para el cultivar 'Diva' de haba (*Vicia faba* L.). En situación intermedia estuvieron los cultivares de haba, 'Alameda', con 226 días e 'Irena', con 242 días. Por otro lado, VN experimentó la emergencia más precoz y 'Alameda' la más tardía.

Tabla 21. Fecha en que se producen los estadios fenológicos en las distintas leguminosas ensayadas en 2005/06. VN: línea IFVN 556-2376' de arvejón (*Vicia narbonensis* L.), 'Alameda', 'Diva' e 'Irena': cvs. de haba (*Vicia faba* L.).

Estadio	Leguminosa			
	'Alameda'	VN	Diva	Irena
Emergencia (E)	13/11	09/11	10/11	10/11
Floración (F)	27/03	05/04	20/04	16/04
Inicio vainas (V)	20/04	24/04	10/05	07/05
Vainas llenas (VL)	08/05	18/05	09/06	02/06
Madurez fisiológica (MF)	09/06	31/05	21/07	25/06

Tabla 22. Duración promedio (días) de los subperíodos fenológicos (subp.) para las leguminosas estudiadas en 2005/06. VN: línea IFVN 556-2376' de arvejón (*Vicia narbonensis* L.), 'Alameda', 'Diva' e 'Irena': cvs. de haba (*Vicia faba* L.).

Subp.	Leguminosa			
	'Alameda'	VN	Diva	Irena
S-E	18	14	15	15
E-F	134	157	161	157
F-V	24	9	20	21
V-VL	18	24	30	26
VL-MF	32	13	42	23
S-MF	226	217	268	242

S-E: siembra-emergencia; E-F: emergencia-floración; F-V: floración-inicio de vainas; V-VL: inicio de vainas-vaina llena; VL-MF: vaina llena-madurez fisiológica; S-MF: siembra-madurez fisiológica.

En todo caso, la diferencia entre la más precoz y la más tardía en emerger fue de solamente cuatro días.

Destaca el corto período de tiempo que medió entre la floración y el inicio de vainas en VN, de sólo 9 días mientras que este intervalo fue de 20-24 días para los cultivares de habas. 'Diva' presentó el período más largo en el llenado de vainas y 'Alameda' el más corto. 'Diva' tuvo también el período más largo entre floración y vainas llenas, mientras que VN destacó de nuevo por mostrar el intervalo más corto de este período.

En la **Figura 6** se muestra la evolución del IAF, de las leguminosas ensayadas, durante todo el ciclo de cultivo. Los valores más altos de IAF máximo ($IAF_{m\acute{a}x}$) y DAF (duración del área foliar) correspondieron a 'Diva' con 7,4 y 539,5 días, respectivamente. Le siguió 'Irena' con un $IAF_{m\acute{a}x}$ de 6,3 y una DAF de 442,6 días. 'Alameda' alcanzó un $IAF_{m\acute{a}x}$ de 5,34 y una DAF de 315,1 días. Finalmente, los valores más bajos de $IAF_{m\acute{a}x}$ y DAF correspondieron a VN, con 4,5 y 279,5 días, respectivamente.

Algunos autores han establecido que la acumulación total de biomasa y el rendimiento en grano en las leguminosas son función principalmente de la DAF (Mínguez *et al.*, 1993; Costa *et al.*, 1997). En un experimento realizado en Córdoba con 'Alameda' se encontró que el máximo rendimiento en grano se obtenía cuando la DAF era superior a 300 días, pudiendo llegar hasta 600 días en cultivos regados y fertilizados. En estos tratamientos, asociados con las elevadas DAF, se alcanzaron valores de $IAF_{m\acute{a}x}$ de 9, y se pudo observar que mientras la biomasa total seguía aumentando al pasar DAF de 300 a 600, el rendimiento en grano se quedaba estancado (Mínguez *et al.*, 1993; Sau y Mínguez, 2000).

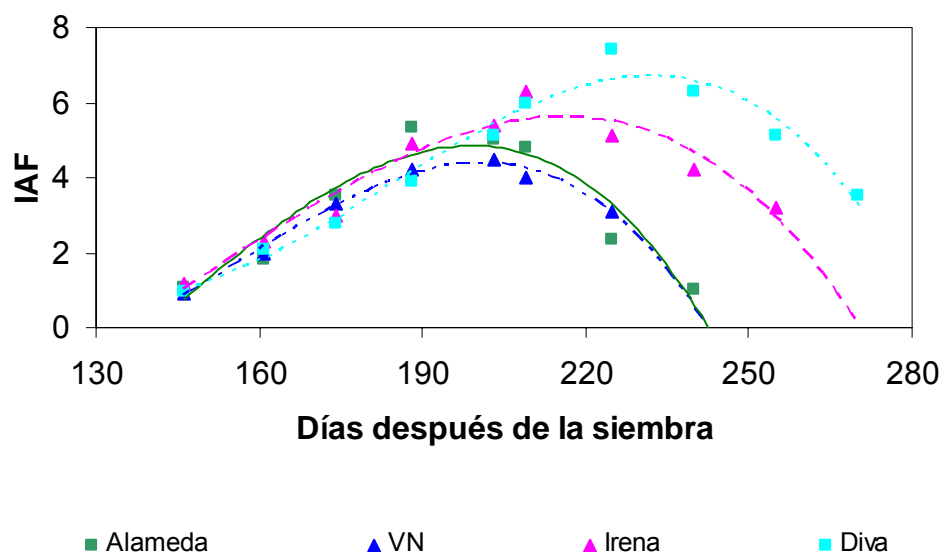


Fig. 6. Índice de Área Foliar (IAF) a lo largo del ciclo del cultivo de las leguminosas estudiadas en 2005/06 y ecuaciones de regresión entre IAF y días después de la siembra (DDS). VN: línea IFVN 556-2376' de arvejón (*Vicia narbonensis* L.). 'Alameda', 'Diva' e 'Irena': cvs. de haba (*Vicia faba* L.).

- - - - ■ IAF 'Diva' = $-0,00002 \cdot DDS^3 + 0,0101 \cdot DDS^2 - 1,7937 \cdot DDS + 103,44$; $r^2 = 0,98$
 - - - - ▲ IAF 'Irena' = $-0,000008 \cdot DDS^3 + 0,0036 \cdot DDS^2 - 0,4611 \cdot DDS + 15,633$; $r^2 = 0,93$
 - - - - ■ IAF 'Alameda' = $-0,00001 \cdot DDS^3 + 0,0043 \cdot DDS^2 - 0,4562 \cdot DDS + 8,6268$; $r^2 = 0,88$
 - - - - ▲ IAF VN = $-0,00001 \cdot DDS^3 + 0,0068 \cdot DDS^2 - 0,9754 \cdot DDS + 43,086$; $r^2 = 0,99$

En la **Tabla 23** se muestran los valores de producción de materia seca en el estado vegetativo, en floración y en llenado de vainas; las fechas en que se realizaron los muestreos correspondientes, y el número de días transcurridos desde la floración (ddf) y desde el inicio de formación de vainas (ddv) hasta el muestreo. Los muestreos se realizaron dentro de una fase fenológica y no exactamente el día del inicio de la misma, por lo tanto los días transcurridos desde el inicio de fase puede no ser coincidente para las distintas leguminosas.

'Diva' e 'Irena' fueron las variedades más productivas en las fases vegetativa y de floración mientras que VN fue la que dio menos producción. En todo caso, las diferencias de 'Diva' e 'Irena' con 'Alameda' no llegaron a ser significativas en ninguna de las dos fases. En la fase de llenado de vainas el

cultivar 'Diva' fue el más productivo, si bien sus diferencias con 'Alameda' y VN no llegaron a ser significativas.

Tabla 23. Materia seca (kg ha^{-1}) de las leguminosas, estudiadas en 2005/06, en muestreos realizados durante las fases vegetativa, de floración y de llenado de vainas, así como los días transcurridos desde la ocurrencia de la fase de floración y formación de primera vaina. VN: línea IFVN 556-2376' de arvejón (*Vicia narbonensis* L.), 'Alameda', 'Diva' e 'Irena': cvs. de haba (*Vicia faba* L.).

Leg	Fase vegetativa		floración			Llenado de vainas		
	Fecha	Kg ha^{-1}	Fecha	Kg ha^{-1}	ddf	Fecha	Kg ha^{-1}	ddv
'Alameda'	6/3	460 ab	1/4	2105 b	5	25/4	4003 ab	5
VN	6/3	300 b	19/4	2006 c	4	4/5	4087 ab	10
Diva	6/3	508 a	29/4	2443 ab	9	18/5	4984 a	8
Irena	6/3	521 a	29/4	2362 ab	13	18/5	3952 b	11

ddf: días después de la floración; ddv: días después del inicio de la formación de vainas
*valores en las columnas seguidos de la misma letra, no difieren entre sí por el test de Duncan ($P < 0,05$)

Las producciones conseguidas en los muestreos realizados en la fase de floración oscilaron entre 2006 kg ha^{-1} , para VN, y 2443 kg ha^{-1} , para 'Diva', que se sitúan dentro del rango de las producciones conseguidas por Iglesias y Lloveras (1998) en Mabegondo (zona costera, a 100 m de altitud), que variaron entre $0,9 \text{ t ha}^{-1}$, para habas sembradas el 30 de octubre y cosechadas el 8 de abril, y $3,3 \text{ t ha}^{-1}$ para las sembradas el 3 de diciembre y cosechadas el 14 de abril.

Conviene señalar que la dosis de siembra utilizada para VN, de 35 semillas m^{-2} , es considerablemente inferior a la de 90 y 140 semillas m^{-2} , recomendada para esta especie por Nadal *et al.* (2004a). La producción de VN encontrada en nuestro experimento concuerda con datos del SO de Australia, en experimentos bajo riego, donde la producción en el estado de floración fue de

1 a 2,3 t ha⁻¹, con densidades de siembra similares a las nuestras (Siddique *et al.*, 1996).

En la Tabla 24 se presenta el contenido en proteína bruta, expresada en porcentaje sobre materia orgánica, de las distintas variedades en los tres muestreos. 'Diva' e 'Irena' no presentaron diferencias significativas en cuanto a contenido de PB para ninguna de las fases, mientras que 'Alameda' mostró menor contenido de PB en el muestreo realizado durante la fase vegetativa.

Tabla 24. Contenido promedio en proteína bruta (% sobre materia orgánica) en estado vegetativo, en floración y en llenado de vainas de las leguminosas estudiadas en 2005/06. VN: línea IFVN 556-2376' de arvejón (*Vicia narbonensis* L.). 'Alameda', 'Diva' e 'Irena': cvs. de haba (*Vicia faba* L.).

Estado	Alameda	VN	Diva	Irena
Vegetativo	13,19 b ³	27,85 a ¹	25,46 a ²	23,00 a ²
Floración	18,63 a ²	20,84 b ²	23,69 a ¹	19,41 a ²
Llenado de vainas	21,01 a ¹	16,94 c ²	18,80 a ²	20,42 a ¹

* dos valores seguidos de la misma letra (en la misma columna) y número (en la misma fila) no difieren entre sí por el test de Duncan (P < 0,05)

En 'Diva' y VN se observó un descenso del contenido porcentual en proteína a medida que avanzaba el estado de madurez de la planta (**Tabla 24**), que responde al comportamiento normal de la mayoría de los cultivos herbáceos (Lemaire y Meynard, 1997) como también ha sido encontrado en variedades de guisante y triticale por Flores *et al.* (2003). Por el contrario, sorprende la tendencia ascendente del contenido porcentual en proteína 'Alameda' con el avance de la madurez, para lo que no se ha encontrado todavía una explicación. En el caso de 'Irena', apenas ha habido diferencias entre los contenidos de las fases de floración y de llenado de vainas, lo que tampoco se acomoda a la tendencia general antes comentada.

Desde el punto de vista del contenido en proteína, los datos sugieren que es mejor hacer el corte para ensilar en el momento de llenado de vainas para

'Alameda' e 'Irena' porque, aparte de tener un mayor contenido en proteína (**Tabla 24**), se consigue una mayor producción de materia seca (**Tabla 23**). Esto coincidiría con lo señalado por Roza *et al.* (2004), que indican que el mejor momento de corte para ensilado en las habas es durante la fase de formación de vainas, porque se combina una alta cantidad de materia seca con unas buenas cualidades nutricionales. El caso de 'Diva' es distinto porque disminuye el contenido en proteína en la fase de llenado de vainas con respecto a la de floración, si bien el contenido en proteína, del 18,8 %, es todavía elevado. Otros autores (Nadal *et al.*, 2004b) sugieren, sin embargo, que es recomendable cosechar durante el estado de floración, en el que se produce una buena combinación entre calidad nutricional y cantidad de forraje cosechado. En nuestro caso, las producciones de materia seca fueron bajas y claramente inferiores en la fase de floración con respecto a la de formación de vainas, lo cual indica que sería aconsejable, de ser posible, esperar hasta la fase de formación de vainas para realizar la cosecha de forraje.

En cuanto a la producción de grano de las habas, 'Diva', con 6345 kg ha⁻¹, es la que dio mejor rendimiento, seguida de 'Irene' y 'Alameda', con 5401 y 4653 kg ha⁻¹, respectivamente, siendo VN la línea menos productiva, con 3896 kg ha⁻¹ (**Tabla 25**). Por tanto y en buena lógica, las producciones son tanto más altas como más largo es el ciclo. Con estos datos obtenidos se puede pensar en la posibilidad de intentar el desarrollo de la producción de grano de leguminosa en algunas zonas gallegas de gran potencial productivo, como es el caso de la Comarca de Lemos (provincia de Lugo), hoy bastante abandonada y con una infraestructura de regadío, desarrollada hace más de 40 años pero nunca rematada. En cuanto al rendimiento de VN, el valor de 3896 kg ha⁻¹, se situó en la parte alta del rango de producciones de la red de experimentos realizados por el Instituto Técnico y de Gestión Agrícola en Navarra, que variaron entre 0,6 y 3,6 t ha⁻¹ (Nadal *et al.*, 2004a,b).

Con respecto al peso de mil granos, 'Alameda' presentó los valores más altos (**Tabla 25**), lo que es lógico ya que pertenece a una combinación de variedades botánicas con semillas de mayor tamaño, como se señaló en el

apartado de material y métodos. VN dio el valor más bajo de peso de mil granos, estando 'Irena' y 'Diva' en una situación intermedia, con pesos de mil granos similares entre ellas.

En cuanto al número de semillas por vaina, fue VN la que dio el valor más alto, seguido de todas las variedades de habas que no presentaron diferencias significativas entre ellas con respecto a este componente (**Tabla 25**). Pilbeam *et al.* (1990) encontraron resultados similares en experimentos con diferentes cultivares de haba en el Reino Unido, en los que no se observaron diferencias significativas en cultivos creciendo en condiciones no limitantes.

Tabla 25. Rendimiento en semilla (Rend. sem.) y componentes del rendimiento de las leguminosas estudiadas en 2005/06: número de vainas por m², peso de mil semillas (P1000), número de semillas por vaina (semillas vaina⁻¹) e índice de cosecha (IC). VN: línea IFVN 556-2376' de arvejón (*Vicia narbonensis* L.), 'Alameda', 'Diva' e 'Irena': cvs. de haba (*Vicia faba* L.).

Variedad	Rend. Sem. (kg ha ⁻¹)	P1000 (g)	Vainas m ⁻² (nº)	Semillas vaina ⁻¹ (nº)	IC (%)
Alameda	4653 c	953,6 a	2253 c	2,1 b	57,2 a
VN	3896 d	280,6 c	4201 b	3,3 a	46,3 c
Diva	6345 a	585,1 b	5676 a	2,0 b	55,1 b
Irene	5401 b	584,0 b	4826 b	2,0 b	55,0 b

* las cantidades seguidas de la misma letra, dentro de cada columna, no difieren entre sí por el test de Duncan ($p < 0,05$).

Los índices de cosecha (IC) variaron entre 46,3 y 57,2%, correspondiendo el valor más alto a 'Alameda', seguido muy de cerca por los de 'Diva' e 'Irena', siendo el más bajo el de VN (**Tabla 25**). Como ya hemos observado en los ensayos de fechas de siembra, el IC de 'Alameda' de este experimento también resultó ser muy alto, situándose en la franja alta de los 33-66%, obtenidos por Loss *et al.* (1997) y Sau (1989).

De los cultivares ensayados, los que dieron mayores producciones de forraje a finales de abril - principios de mayo fueron el haba 'Alameda', por ser

la más precoz, y el arvejón. Por el contrario, las producciones de 'Diva' e 'Irena' fueron bastante bajas en este momento por lo que son, en principio, menos adecuadas para su cultivo como forraje de invierno en rotación con maíz, que necesita que la tierra esté libre del cultivo anterior a finales de abril. Sin embargo, la susceptibilidad de 'Alameda' al ataque de hongos en la fecha de siembra estudiada en este trabajo, pone en duda su utilidad para el cultivo en Galicia, por lo que habrá que ensayar otras variedades que permitan una siembra temprana.

Si la opción fuese producir grano, las variedades más recomendables serían 'Diva', en primer lugar por ser la más productiva, e 'Irena', en segundo. La distinta precocidad de maduración fisiológica de estas dos variedades (**Tabla 23**) puede hacer recomendable el uso de 'Irena' en algunos ambientes, por adelantar en casi un mes la fecha de recolección respecto a 'Diva', a pesar de su menor producción.

Si bien se trató de un solo año de experimentación, los resultados obtenidos muestran que el agroclima de Lugo es adecuado para el cultivo de habas y arvejones para grano, con la posibilidad de ser utilizados como cultivos forrajeros de invierno, en rotación con maíz, en el caso de que muestren una buena producción forrajera a finales de abril-principios de mayo. De los cultivares estudiados, solamente el arvejón y el haba 'Alameda' cumplirían este requisito para la producción de forraje.

En el caso de que la opción sea la producción de grano, para una fecha de siembra temprana, se podrían utilizar cultivares de habas de ciclo más largo, como 'Diva' e 'Irena' ya que no presentan los problemas fúngicos que encontramos en 'Alameda'.

1.4. CONCLUSIONES

1. Para el cultivar 'Alameda', creciendo en el agroclima de Lugo en condiciones no limitantes, la fecha de siembra que presentó el mayor rendimiento en granos (7733 kg ha^{-1}) fue la sembrada a mediados de febrero. Así mismo los números de vainas y semillas por m^2 fueron mayores que en las restantes fechas de siembra, siendo también superior el índice de cosecha (IC) (67.6 %). Esta fecha de siembra presenta le mayor índice de área foliar (IAF_{max} = 5.41) así como la mayor eficiencia en el uso de la radiación PAR (EUR= 1.68 g MJ^{-1}). No existieron diferencias significativas en biomasa total aérea entre esta fecha de siembra y la 2ª (mediados de diciembre).
2. La 1ª fecha de siembra (fines de octubre-principios de noviembre) no es recomendable para obtención de grano ya que presenta bajos rendimientos. Además, el cultivo demora mucho tiempo antes de producirse la emergencia y luego de ésta, presenta tasas de crecimiento muy bajas, lo que beneficia el ataque de plagas y enfermedades fúngicas. Sin embargo, esta fecha posee buena cantidad de MS en el estadio de vainas, lo que indica que podría ser utilizada en rotación con el maíz, cuya siembra en Galicia se realiza en el mes de abril.
3. Las siembras de primavera (4ª fecha: última semana de marzo - primera semana de abril; 5ª fecha: última semana de abril - primera semana de mayo) tuvieron menor rendimiento en grano, que disminuye a medida que se atrasa la fecha de siembra, con menor número de vainas por m^2 y menor peso de mil semillas. Presentan un IAF crítico más alto que las siembra otoño-invernales, y un coeficiente de extinción de la radiación PAR (k) menor.

4. Las fechas de siembra extremas (1^a y 5^a) presentaron menor rendimiento, menor número de vainas por m² e IC más bajos que las restantes fechas de siembra.
5. Si bien se trató de un solo año de experimentación, los resultados obtenidos muestran que el agroclima de Lugo es adecuado para el cultivo de otros cultivares de habas y arvejones para grano, con la posibilidad de ser utilizados como cultivos forrajeros de invierno, en rotación con maíz, en el caso de que muestren una buena producción forrajera a finales de abril-principios de mayo. De los cultivares estudiados, solamente el arvejón y el haba 'Alameda' cumplirían este requisito para la producción de forraje.
6. En el caso de que la opción sea la producción de grano, para una fecha de siembra temprana, se podrían utilizar cultivares de habas de ciclo más largo, como 'Diva' e 'Irena' ya que no presentan los problemas fúngicos que encontramos en 'Alameda'.



Capítulo 2

PARAMETRIZACIÓN DEL SUBMODELO DE FENOLOGÍA DE CROPGRO-FABABEAN

2.1. INTRODUCCIÓN

Las interacciones entre los cultivos y su ambiente integran procesos físicos, químicos y biológicos, cuyo estudio y comprensión son extremadamente complejos. Los sistemas biológicos, objeto de estudio de la Agronomía son sistemas jerárquicos, caracterizados por sus múltiples niveles de organización (Thornley y Jonson, 1990) y entendemos por modelo a la representación simplificada de un objeto o de un sistema (Forrester, 1972).

El aumento de la demanda de productos agrícolas y la mayor presión ejercida sobre la tierra, agua y otros recursos naturales han provocado un incremento en la información necesaria para la toma de decisiones en la agricultura; además, la generación de nuevos datos por medio de los métodos agronómicos tradicionales y su posterior publicación, no son suficientes para cubrir las nuevas necesidades ya que la experimentación agronómica tradicional se lleva a cabo en un punto particular del tiempo y el espacio, con resultados de un sitio y estación específicos, con alta demanda de tiempo, esfuerzo y medios económicos. Así, en la actualidad, en que se busca una productividad cada vez mayor de los cultivos agrícolas comerciales, pero al mismo tiempo se busca también la sustentabilidad de los sistemas de producción agrícola, los modelos de crecimiento de cultivos constituyen una de las más importantes herramientas utilizadas, en busca del entendimiento de los diversos procesos comprendidos en dichos sistemas y sus interrelaciones (Jones, *et al.*, 2003).

Los modelos de simulación de cultivos tienen varias aplicaciones actuales y potenciales en respuesta a temas relacionados con investigación, manejo de cultivos, y planificación. Pueden ayudar a la comprensión de las interacciones genético-fisiológico-ambientales, con una integración interdisciplinaria. Permiten definir estrategias de producción en la etapa de planificación de un cultivo

futuro o bien ayudar a tomar decisiones tácticas durante el ciclo del cultivo tales como: prácticas culturales, fertilización, irrigación y uso de pesticidas. Como herramienta de planificación permiten cuantificar a través de la predicción, el impacto de los procesos de erosión, contaminación por agroquímicos, distintas estrategias ante el cambio climático y el pronóstico de rendimiento a nivel regional (Boote *et al.*, 1996). Los modelos de cultivo son útiles para optimizar prácticas de manejo tales como época de siembra, espaciamiento, uso del agua y planificación de riego. Modificando la escala de espacio y tiempo, los modelos nos permiten abordar fenómenos climáticos como el ENSO (El Niño Oscilación Sur) analizando en forma interactiva el impacto de la variabilidad climática y las decisiones de manejo sobre la productividad de los cultivos, resultado difícil de obtener a partir de análisis estadísticos clásicos o experimentos agronómicos tradicionales (Royce *et al.*, 1998). Por otra parte estos modelos tienen una gran potencialidad como herramienta para evaluar factores genéticos que determinan la acumulación y ubicación de la materia seca producida para distintos ambientes y para diferentes prácticas de manejo, permitiendo entonces evaluar características genéticas para incrementar el rendimiento potencial mediante, por ejemplo, una mejora en: fotosíntesis, reparto de asimilados, translocación desde las partes vegetativas y mayor duración del período de llenado de grano (Boote y Tollenaar, 1994; Jones *et al.*, 2003).

2.1.1. Análisis de sistemas y modelos de simulación

Han transcurrido más de 80 años de estudios de los efectos cuantitativos de los elementos agrometeorológicos sobre el crecimiento y la productividad de diversos cultivos; durante este largo tiempo se han empleado diferentes métodos para describir el crecimiento y la productividad en respuesta al manejo y las variaciones ambientales. Inicialmente, esos modelos eran simplemente un ajuste de curva entre tiempo y materia seca aérea acumulada; más tarde, con los avances de la fisiología de cultivos y la estadística, sumado al aumento de la capacidad y la disponibilidad de los ordenadores, se desarrollaron métodos más complejos y sofisticados (Blackman, 1919; Goudrian y Monteith, 1990).

Un avance importante para el estudio de la relación entre el cultivo y las variables ambientales fue la introducción de modelos mecanicistas de simulación de crecimiento de los cultivos (De Wit *et al.*, 1965, Duncan *et al.*, 1967; Keulen, 1975). Estos modelos, de los más simples a los más complejos buscan explicar, apoyándose en la fisiología de cultivos, el sistema que se pretende modelizar; de esta forma, sus parámetros deben tratar de tener un significado fisiológico y permitir estimar el incremento de biomasa diario (dw/dt) así como su reparto entre los diferentes órganos de la planta.

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 del sistema estudiado (maqueta), 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. Los modelos de los sistemas agrícolas suelen ser inestables.

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 de 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 ecuaciones y parámetros, presentando la desventaja de ser generalmente muy complejos y precisar, en consecuencia de numerosas estimaciones. 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 ya que 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.

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) de los empleados en la fase de calibración (Jones y Luyten, 1998).

Los primeros modelos de cultivo se enfocaron hacia la producción potencial, sin considerar limitaciones de agua, nutrientes, plagas, enfermedades ni malas hierbas, ya que en principio es la situación más sencilla de modelizar. En las últimas 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 lo que ha permitido obtener una mejor descripción de los mecanismos de crecimiento y la posterior evaluación de los modelos de crecimiento disponibles (Boote *et al.*, 1998).

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 y recursos, no sólo desde el punto de vista productivo o económico, sino también de la sostenibilidad de las producciones y el mantenimiento de los equilibrios ambientales (Jacobson *et al.*, 1995).

2.1.2. El modelo CROPGRO de simulación del crecimiento de leguminosas

Entre los modelos de leguminosas más mecanicistas se destaca el CROPGRO (Boote *et al.*, 1998).

CROPGRO fue creado después de la experiencia de adaptar el modelo SOYGRO (Wilkerson *et al.*, 1983) que simula el crecimiento de la soja (*Glycine max* L. Merr.) a PNUTGRO y BEANGRO (Hoogenboom *et al.*, 1994) que simulan el crecimiento del cacahuete (*Arachis hypogaea* L.) y de la judía (*Phaseolus vulgaris* L.), respectivamente, lo que mostró a los autores la importancia de tener un programa común o “plantilla” para muchos cultivos, sumado a la información proveniente de archivos individuales para cada especie a ser modelada. CROPGRO fue entonces desarrollado con un enfoque genérico para predecir el crecimiento de diferentes cultivos. Actualmente CROPGRO simula el crecimiento de diez cultivos, incluidos siete leguminosas de grano: (soja (*Glycine max* L. Merr.); cacahuete o maní (*Arachis hypogaea* L.); judía, poroto o frijol (*Phaseolus vulgaris* L.); garbanzo (*Cicer arietinum* L.), caupí (*Vigna unguiculata* (L) Walp), mucuna o frijol terciopelo (*Mucuna pruriens* L.) y haba (*Vicia faba* L.), así como cultivos de otras familias botánicas, como tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.); pasto braquiaria (*Brachiaria decumbens* Sapf.) y yuca, mandioca o casabe (*Manihot esculenta* Crantz). Esta versatilidad es lograda por medio de archivos de entrada que definen las características de cada especie: un archivo de especie (*.SPE), un archivo que

define el ecotipo (*.ECO) y finalmente un archivo que define las características propias del cultivar (*.CUL).

En la actualidad la versión más reciente es CROPGRO V4.0. que está incorporada al sistema DSSAT-CSM - actualmente DSSAT V4.0 -(Decisión Support System for Agrotechnology Transfer-Cropping System Model).

El paquete DSSAT fue originalmente desarrollado por el proyecto International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer (IBSNAT, 1993; Tsuji, 1998; Uehara, 1998; Jones *et al.*, 1998) para facilitar la aplicación de los modelos de cultivos en la investigación agronómica. Este desarrollo inicial fue motivado por la necesidad de integrar conocimientos acerca del suelo, clima, cultivos y manejo de los cultivos con el fin de facilitar la toma de decisiones para transferir la producción tecnológica desde un lugar a otro en los que suelo y clima son diferentes (IBSNAT, 1993). De esta forma este paquete de programas permite la unificación de los formatos de datos de entrada y salida (clima, suelo, datos de manejo y experimentales) con los de otros modelos de diferentes cultivos, tornándolos más útiles y compatibles (Jones *et al.*, 2003).

El lenguaje de programación del actual módulo y del modelo CROPGRO es Fortran y el paso de cálculo principal es el diario; la descripción de las tasas de cambio de materia seca, acumulación y removilización de proteínas y cambios en el número de vainas y semillas se realiza con ecuaciones diferenciales no lineales de primer orden (Wilkerson *et al.*, 1983).

El CROPGRO está compuesto por cuatro secciones que interactúan: (1) desarrollo, (2) balance de carbono, (3) balance de agua y (4) balance de nitrógeno. La sección balance de carbono es la base del modelo e incluye las subsecciones de fotosíntesis del dosel, respiración, removilización de nitrógeno y senescencia de los tejidos (Jones y Ritchie, 1991). La sección de desarrollo o fenología rige el esquema de reparto de asimilados entre los diferentes órganos de la planta, determina el inicio de la removilización de nitrógeno, participa en el crecimiento en superficie de las hojas e interviene en la subsección de senescencia.

Las variables de estado son las cantidades -peso, masa o número- de tejidos, mientras que las variables de tasa representan las velocidades de cambio de las variables de estado como incrementos, transformaciones o reducciones (Jones y Boote, 1987).

En el caso del balance de carbono, cada día se generan ganancias de carbono fijado por la fotosíntesis, conversiones y condensaciones de carbono dentro de los tejidos del cultivo, así como pérdidas por las respiraciones de crecimiento y de mantenimiento.

El balance de nitrógeno comprende la extracción de nitrógeno del suelo diaria, la fijación simbiótica, la movilización desde los tejidos vegetativos hacia los reproductivos, la tasa de utilización de nitrógeno por los tejidos nuevos y la tasa de pérdida de nitrógeno por abscisión de los tejidos senescentes.

Por su parte, el balance de agua incluye la infiltración del agua de lluvia y de riego, la evaporación del suelo, la redistribución del agua en los diferentes horizontes, las extracciones de agua realizadas por el cultivo, la transpiración del dosel vegetal y el agua perdida por percolación más allá del frente de raíces o por escorrentía.

Aunque el principal intervalo de tiempo entre dos cálculos utilizado por el modelo es diario (para estar acorde con los datos agrometeorológicos provenientes de estaciones convencionales), algunos procesos como la fotosíntesis o la evolución fenológica utilizan un paso horario. Para ello el modelo estima temperaturas horarias a partir de las temperaturas máximas y mínimas diarias. Todas las variables de estado del modelo son calculadas diariamente y se pueden ver en las salidas de las simulaciones (*.OUT). Además, el modelo permite observar los componentes del rendimiento y la situación del sistema en el momento de la madurez, tanto fisiológica como de cosecha.

2.1.2.1. Desarrollo del cultivo

En los cultivos simulados con CROPGRO, el reparto de asimilados entre las diferentes partes de la planta depende de la edad fisiológica de la planta, o sea, de su estadio de desarrollo. Por tanto, para poder predecir de forma precisa el crecimiento y el rendimiento de estas especies, es preciso disponer de un submodelo fenológico que permita simular con precisión el calendario y la duración de cada una de las fases del cultivo, así como de la duración global del ciclo (Hodges, 1991).

El desarrollo del cultivo en CROPGRO presenta fases de crecimiento con diferencias en la sensibilidad a la temperatura, fotoperíodo, déficits (hídrico y de nitrógeno). El ciclo completo de los cultivos se divide en este modelo en 13 fases, comprendidas entre siembra y madurez de cosecha. Cada una de estas fases tiene un único acumulador de desarrollo que empieza a sumar en un estadio de desarrollo dado y termina de hacerlo cuando supera un valor umbral preestablecido, considerándose que entonces se produce el estadio de desarrollo siguiente. La tasa de desarrollo fisiológico expresada como día fisiológico transcurrido por día del calendario ($DF/día$, Ec. 10), durante una fase de desarrollo es función de la temperatura (T), fotoperíodo (P) y el déficit hídrico. Cada una de estas funciones adopta valores comprendidos entre 0 y 1.

$$DF / día = f(T) * f(P) * f(déficit hídrico) \quad \text{Ec. 11}$$

La función respuesta a la temperatura es una función lineal, definida por cuatro temperaturas cardinales: T_b : temperatura horaria por debajo de la cual no hay evolución fenológica; en algunos cultivos de invierno también influye la vernalización, entonces se incluye el factor de vernalización en la Ec. 11. Además, la tasa de desarrollo del cultivo no tiene la misma respuesta a los factores ambientales antes mencionados a lo largo de todo su ciclo. Si las condiciones ambientales son óptimas, se acumula un día fisiológico para cada

día del calendario que transcurre. Así, el número de días fisiológicos necesarios para completar una fase del ciclo es igual al número de días del calendario si la temperatura, el fotoperíodo y las condiciones hídricas son las óptimas.

La subrutina de desarrollo del cultivo permite utilizar diferentes ecuaciones así como diferentes valores de temperaturas base y óptima en función del subperíodo fenológico. Esta subrutina genérica funciona para diferentes especies y cultivares. Los tipos de función empleadas, los valores de temperaturas base y óptima así como los puntos de partida para cada una de las fases del ciclo de los diferentes cultivos, vienen especificados en los archivos que definen las diferentes especies (*.SPE). En este archivo también existe información cuantitativa sobre procesos del crecimiento (fotosíntesis, respiración de mantenimiento, crecimiento de los nódulos, fijación de nitrógeno atmosférico, expansión foliar, adición de vainas, crecimiento de semillas, movilización de nitrógeno, etc.), propios de la especie simulada.

Como se mencionó más arriba, las características de un cultivo están recogidas en los parámetros contenidos en tres archivos: especie (*.SPE), ecotipo (*.ECO) y cultivar (*.CUL). En la **Tabla 21** se pueden observar los parámetros contenidos en el archivo especie (*.SPE), en el que están definidas las características comunes a todos los cultivares de la especie.

Por su parte, los coeficientes genéticos que caracterizan cada cultivar se encuentran en dos archivos: 1.- el archivo *.CUL agrupa los coeficientes que están referidos a las características más variables entre los cultivares (**Tabla 22**) y 2.- el archivo *.ECO en el que se encuentran coeficientes que se relacionan con las características comunes de cada grupo de madurez o ecotipo (**Tabla 23**).

En general, CROPGRO ha sido diseñado para ser aplicado en cualquier parte del mundo, pero es necesario calibrarlo para cada nueva variedad y región en que no haya sido previamente utilizado. Desde su concepción inicial

hasta su aplicación práctica, el modelo pasa por varias fases: construcción, calibración, validación y aplicación.

Calibración es el proceso iterativo de búsqueda de los valores de los coeficientes que produzcan la menor discrepancia entre resultados simulados y observados, lo cual significa la medición, estimación o ajuste de sus valores para mejorar la precisión predictiva del modelo con respecto a algunas variables o a una(s) población(es) o escenario(s) agrícola(s) en particular.

Tabla 21. Resumen de los tipos de parámetros usados en el módulo de Plantilla de cultivos.

Sección	Descripción
Fotosíntesis	Funciones que definen el efecto del N foliar y de la temperatura sobre la fotosíntesis.
Respiración	Parámetros de respiración asociada con varios procesos del crecimiento. Concentración “máxima”, “de crecimiento normal”, y “final” en proteína de hojas, tallos, raíces, vainas, semillas y tejidos de nódulos.
Composición de la planta	Porcentaje de carbohidrato-celulosa, lípidos, lignina y ácidos orgánicos de hojas, tallos, raíces, vainas semillas y tejido nodular. Efecto de la temperatura sobre el contenido de lípido de la semilla.
Parámetros de carbono y nitrógeno	Coefficientes para la acumulación de reserva de carbohidratos en el tejido de los tallos.
Parámetros de fijación de nitrógeno	Parámetros para el crecimiento de los nódulos y su senescencia. Matriz de datos que define el efecto de la temperatura, agua del suelo, y edad de los nódulos sobre la fijación y el crecimiento de los nódulos.
Parám. de crecimiento de planta y partición (reparto de asimilados)	Reparto de la materia seca hacia hojas, tallos y raíces como una función del estadio vegetativo. Coeficientes de reparto en emergencia, estadio final de crecimiento, senescencia del tallo, durante el estrés hídrico y crecimiento de los nódulos. Parámetros que indican la influencia que tienen la temperatura y la radiación solar en la expansión foliar. Parámetros de profundidad y longitud inicial de raíces y extracción de agua.
Factores de senescencia	Parámetros de senescencia relacionados con el estadio vegetativo, daño por congelación, movilización de nitrógeno, sequía y autosombreado de la cubierta.
Parámetros fenológicos	Curvas que definen el efecto de la temperatura sobre el desarrollo vegetativo y reproductivo (temprano y tardío). Parámetros para cada estadio de crecimiento: estadio precedente, función de fotoperíodo, función de temperatura, sensibilidad a la temperatura y el agua, sensibilidad al N y P.
Parám. de alto y ancho del dosel	Largo de los entrenudos e incremento del ancho del dosel como una función del estadio vegetativo. Elongación de los entrenudos como una función de la temperatura y el flujo de fotones fotosintéticos.

Fuente: Jones *et al.* (2003)

Tabla 22. Coeficientes genéticos del archivo *.CUL (archivo de cultivar; Boote *et al.*, 1998).

CODIGO	Descripción
CLDL	Longitud del día por encima de la cual el desarrollo reproductivo no se ve afectado por la longitud del día (para plantas de día largo) (h). Fotoperiodo óptimo por encima de este valor.
PPSEN	Pendiente de la respuesta relativa de desarrollo con el fotoperíodo en función del tiempo (negativa para plantas de día largo) (1 / h).
EM-FL	Tiempo (días fototérmicos) desde el final de la fase juvenil hasta la aparición de la primera flor, duración mínima con temperatura (T) y fotoperíodos (P) óptimos. (T y F op)
FL-SH	Tiempo (días fototérmicos) desde la primera flor a la primera vaina mayor de 0.5 cm (T y P op).
FL-SD	Tiempo (días fototérmicos) desde la primera flor a la primera semilla (T y P op).
SD-PM	Tiempo (días fototérmicos) desde la primera semilla a madurez fisiológica (T y P op).
FL-LF	Tiempo (días fototérmicos) desde la primera flor al final del crecimiento de hojas (T y P op).
LFMAX	Tasa fotosintética máxima ($\text{mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) con saturación lumínica y temperatura óptima.
SLAVR	Área foliar específica ($\text{cm}^2 \text{ g}^{-1}$) para hojas nuevas durante el pico de crecimiento vegetativo.
XFRUIT	Fracción máxima de la fotosíntesis bruta diaria disponible para semillas y vainas.
WTPSD	Peso máximo de semilla (g) bajo condiciones no limitantes de sustrato.
SFDUR	Duración (DPT; días fototérmicos) del llenado de semilla.
SDPDV	Número de semillas por vaina.
PODUR	Tiempo (DPT; días fototérmicos) requerido para que el cultivo adquiera la carga completa de vainas en condiciones óptimas, usado para computar la tasa de formación de flores y vainas.

Tabla 23. Coeficientes genéticos del archivo *.ECO (archivo de ecotipo; Boote *et al.*, 1998).

CODIGO	Descripción
MG	Número de grupo de madurez para cada ecotipo.
THVAR	Tasa mínima de desarrollo reproductivo bajo temperatura óptima y condiciones de días largos o cortos, según se trate de una leguminosa de día corto o de día largo, respectivamente.
PL-EM	Tiempo (días térmicos) entre siembra y emergencia (T óptima).
EM-V1	Tiempo (días térmicos) requerido de emergencia a la primera hoja verdadera (T óptima).
V1-JU	Tiempo (días térmicos) requerido de emergencia al final de la fase juvenil.
JU-R0	Tiempo (días fototérmicos) requerido para la inducción floral (T y F óptimos).
PM09	Proporción de tiempo entre la formación de la primera semilla y madurez fisiológica, en el que puede desarrollarse la última semilla.
LNGSH	Tiempo (días fototérmicos) requerido para el crecimiento de las vainas (T y P óptimos).
R7-R8	Tiempo (días fototérmicos) entre madurez fisiológica (R7) y madurez de cosecha (R8) (T y P óptimos).
RIPRO	Incremento en la sensibilidad a la longitud del día después de floración (CSDL decrece por este valor (h)).
FL-VS	Tiempo (días fototérmicos) desde la primera flor a la última hoja sobre el tallo principal (T y P óptimos).
TRIFOL	Tasa de aparición de hojas (días térmicos ⁻¹) en el tallo principal, hojas por día térmico (T óptima).
SIZELF	Tamaño (cm ² hoja ⁻¹) de una hoja normal (nudo 8 ^o - 10 ^o).
THRSH	Relación (% en peso) máxima de semilla (semilla + carpelo) ⁻¹ a madurez.
SDPRO	Porcentaje de proteína en semilla (g _{proteína} g _{semilla} ⁻¹).
SDLIP	Porcentaje de lípido en semilla (g _{lípidos} g _{semilla} ⁻¹).

En esta fase, investigadores de diferentes partes del mundo utilizaron información de campo, independiente de la usada en la construcción del modelo, a fin de ajustar los valores de los coeficientes genéticos de las variedades propias de sus latitudes. Así, en la base de datos de genotipo del programa DSSAT, están documentados los valores de los coeficientes genéticos de ESPECIE, ECOTIPO y CULTIVAR correspondientes a determinadas variedades y ecotipos de una determinada especie. Cuando se desea emplear con éxito el modelo para una variedad que no se encuentra documentada en la base de datos, es necesario determinar los valores de los coeficientes genéticos que la caracterizan y registrarlos en el archivo de CULTIVAR (Boote *et al.*, 1998, 2003). La obtención de los valores más adecuados de los coeficientes genéticos puede lograrse mediante la medición de variables en ensayos realizados en condiciones de campo y a través de su determinación en forma manual o automatizada (Hunt *et al.*, 1993; Grimm *et al.*, 1993). Los datos necesarios para la calibración de algunos coeficientes genéticos, como los relacionados con la fenología, también se pueden obtener en ensayos bajo condiciones controladas (Steinmaus *et al.*, 2000), pero en principio, cuanto más similares sean las condiciones ambientales a las de cultivo, se puede suponer que los coeficientes obtenidos permiten obtener simulaciones más cercanas a la realidad.

El ajuste de los coeficientes genéticos puede ser muy tedioso y requerir mucho tiempo cuando se realiza de modo manual. Por esto se trata de agilizar mediante programas de optimización. Una nueva alternativa son los métodos de optimización global (Espósito y Floudas 1998, Gau *et al.* 2000) que se clasifican en deterministas y estocásticos. Los deterministas ofrecen una garantía teórica para minimizar globalmente la función objetivo. No obstante, éstos se caracterizan por ser demandantes en tiempo de cómputo y generalmente requieren reformulaciones del problema (Gau *et al.* 2000). Por otra parte, los estocásticos son herramientas confiables que presentan un tiempo de cómputo razonable en la optimización global de funciones multivariadas y multiobjetivo. El método de temple simulado (TS), también

llamado recocido simulado (simulated annealing) es una generalización de los métodos Monte Carlo para localizar estadísticamente el óptimo global de una función multivariable (Kirkpatrick *et al.* 1983, Goffe *et al.* 1994). Este algoritmo realiza una búsqueda parcial estocástica dentro de la región permitida para un conjunto de variables de optimización. En problemas de minimización, las perturbaciones que ocasionan incrementos en el valor de la función objetivo son aceptadas con una probabilidad controlada empleando el criterio de Metropolis *et al.* (1953). Estas perturbaciones se realizan en varias ocasiones y permiten que el algoritmo escape de mínimos locales.

Generalmente, el TS puede localizar el óptimo global de la función objetivo o una aproximación a éste, en tiempos de cómputo razonables. Se han desarrollado diversos algoritmos para el TS, que difieren principalmente en los mecanismos para perturbar las variables de optimización y en el procedimiento para modificar los parámetros del TS durante la secuencia de optimización (Van Laarhoven y Aarts 1987).

Goffe *et al.* (1994) han desarrollado una subrutina codificada en lenguaje Fortran para este algoritmo que se utilizará en este trabajo.

Luego de la calibración, el modelo debe ser validado. Antes de cada aplicación sucesiva de CROPGRO a escenarios diferentes se deben realizar evaluaciones objetivas de sus capacidades. La prueba crucial de utilidad del modelo se hace mediante la validación o comparación de los resultados simulados con juegos de datos de campo diferentes a los utilizados en la calibración.

2.1.2.2. Balance de Carbono

La simulación del aumento total de biomasa del cultivo se apoya sobre un balance de carbono que incluye la fotosíntesis bruta, la respiración, el reparto de asimilados, la removilización de proteínas y carbohidratos desde los tejidos vegetativos, y la abscisión de algunos órganos de la planta.

El hidrato de carbono (glucosa $\approx \text{CH}_2\text{O}$) es “la unidad molecular básica” utilizada en CROPGRO para calcular la fotosíntesis bruta, la respiración de mantenimiento, así como la conversión de la glucosa mediante la respiración de crecimiento en peso seco de tejido de la planta, resultando pesos de las distintas partes de la planta que son expresadas como peso seco.

La tasa de cambio del peso seco de los componentes de la materia seca total, resultante de los cambios en el balance de carbono del cultivo, se calcula mediante ecuaciones diferenciales no lineales de primer orden. La tasa de cambio en el total de materia seca del cultivo (W ; g m^{-2}), es descrita como:

$$dW/dt = W^+ - S_L - S_S - S_R - S_{SH} - C_T - P_T \quad \text{Ec. 12}$$

donde S_L , S_S , S_R , y S_{SH} son partes perdidas de hojas, tallos, raíces y vainas respectivamente, C_T es la parte de la fotosíntesis bruta que contribuye a engrosar la reserva (“pool”) de hidratos de carbono, P_T la cantidad de biomasa perdida debido a plagas y enfermedades; el crecimiento nuevo, W^+ , es función de la fotosíntesis bruta (P_g), de la respiración de mantenimiento (R_m) y de la eficiencia de la conversión (E) de g de CH_2O en g de materia seca como muestra la ecuación 13:

$$W^+ = E * (P_g - R_m) \quad \text{Ec. 13}$$

2.1.2.3. Fotosíntesis del cultivo

En el modelo CROPGRO, la fotosíntesis es dependiente de la intercepción de luz, edad de la hoja, temperatura, concentración de CO₂, estrés hídrico y concentración de de clorofila en hojas (Boote y Pickering, 1994).

La fotosíntesis puede ser calculada en función de dos opciones: 1) la fotosíntesis diaria de la cubierta vegetal o, 2) la fotosíntesis horaria a nivel de hoja.

- Fotosíntesis diaria de la cubierta vegetal (modelo más empírico)

Las ecuaciones utilizadas son próximas a la de los modelos que se apoyan sobre la eficiencia en el uso de la radiación (EUR), exceptuando que la EUR empleada (pendiente de la fotosíntesis bruta *versus* radiación solar fotosintéticamente activa) no es constante y que la respiración se calcula por separado.

En primer lugar, se calcula la fotosíntesis diaria para una cubierta vegetal óptima, en función de la radiación solar diaria, para luego multiplicarla por factores comprendidos entre 0 y 1 para la intercepción de luz, la temperatura, el contenido en nitrógeno de la hoja y el déficit hídrico.

- Fotosíntesis horaria a nivel de hoja (modelo más mecanicista)

Este modelo, al ser mucho más complejo que el anterior, permite describir de manera más mecanicista la respuesta de la fotosíntesis a la temperatura, a la concentración de CO₂ y a la radiación solar. Además, la simulación proporciona resultados más realistas de la respuesta de la intercepción de luz y del crecimiento, a la distancia entre líneas y a la densidad de plantas. En el mismo existe una distribución horaria de la radiación solar y el flujo de fotones fotosintéticos. Las temperaturas del aire son calculadas en forma horaria usando una función combinada (curva seno-exponencial para cada hora del

día) (Parton y Logan, 1981; Kimball y Bellamy, 1986). La radiación solar total horaria está dividida en sus componentes directa y difusa usando un algoritmo entre la fracción difusa y la transmisión atmosférica (Erbs *et al.*, 1982; Spitters *et al.*, 1986). Cada hora, la intercepción y absorción de la radiación solar directa y difusa por cada estrato del dosel es computada como una función de la altura y el ancho del dosel, índice de área foliar (IAF), ángulo foliar, dirección de las filas o hileras, latitud, día del año y hora del día (Boote y Pickering, 1994). Se considera que las plantas individuales tienen sus hojas distribuidas en una elipsoide, y que la absorción de la luz acontece por efectos del espaciamiento entre filas o hileras de plantas elipsoidales dentro de la hilera. La absorción de flujo de fotones fotosintéticos se considera para hojas soleadas y también para las sombreadas. La fotosíntesis horaria del dosel por superficie de suelo es computada desde la suma de la contribución de hojas soleadas y sombreadas por multiplicación de la tasa fotosintética de hojas de cada tipo por sus respectivos IAF. Los valores horarios de asimilación son sumados para obtener el total de fotosíntesis bruta diaria.

2.1.2.4. Respiración de crecimiento y de mantenimiento

La respiración de mantenimiento es función de la temperatura, de la tasa de fotosíntesis bruta y de la biomasa del cultivo, a la que se le restan los lípidos y las proteínas almacenadas en las semillas. El aumento relativo de la respiración con la temperatura es similar a la respuesta Q_{10} (1.85) descrita por McCree (1974).

La respiración de crecimiento y la eficiencia de la conversión de la glucosa en tejidos de la planta se calculan utilizando la teoría de los equivalentes-glucosa desarrollada por Penning de Vries *et al.* (1974) y Penning de Vries y Van Laar (1982). Esta aproximación requiere estimaciones de la composición de los tejidos en seis tipos de compuestos: proteína, lípidos, lignina, carbohidratos-celulosa, ácidos orgánicos y minerales (Wilkerson *et al.*, 1983,

Boote *et al.*, 1986, Jones *et al.*, 1989). Los equivalentes glucosa necesarios para la síntesis de los diferentes tejidos dependen de la composición química del tejido y de las rutas metabólicas empleadas para su síntesis. Esta aproximación permite calcular: a.- la glucosa respirada para proveer ATP, NADH, y NADPH para la biosíntesis; b.- condensación, reducción e incremento del contenido de energía del tejido.

La **Tabla 24** muestra el costo de energía (en glucosa) para la síntesis y el equivalente glucosa que permanece condensado en el producto.

Tabla 24. Costo en equivalente glucosa para la respiración de crecimiento y síntesis de seis clases de componentes de las plantas.

Costo en glucosa para crecimiento y síntesis (g glucosa / g producto)				
Componente de la planta	Costo de energía	C en producto	Costo total	Eficiencia de conversión (g de producto / g de glucosa)
Proteína				
Desde NH ₄ ⁺	0.36	1.34	1.70	0.59
Desde NO ₃ ⁻	1.22	1.34	2.56	0.39
Celulosa	0.11	1.13	1.24	0.81
Lípido	1.17	1.94	3.11	0.32
Lignina	0.62	1.55	2.17	0.46
Ac. orgánicos	0.00	0.929	0.929	1.08
Minerales	0.05	0.00	0.050	—

Fuente: Boote *et al.* (1998) en: Agricultural Systems Modeling and simulation.

Se puede observar que la síntesis de lípido es muy costosa (3.11 g glucosa / g producto), tanto en términos de energía requerida como de energía almacenada en el lípido. Las proteínas son también costosas, particularmente si el N es asimilado vía nitrato (NO₃⁻) o fijación de N₂ atmosférico. A pesar de que el costo de proteínas partiendo de amonio (NH₄⁺) parece ser menor, el modelo considera que la absorción del nitrógeno del suelo se hace en forma de

ión nitrato, porque en la mayor parte de los suelos, la nitrificación convierte rápidamente la mayor parte del amonio en nitrato. Según esto, son necesarios 2.56 g de glucosa para producir un gramo de proteína a partir de nitrógeno, procedente del ión nitrato, mientras que si el nitrógeno procede de la fijación simbiótica, el proceso es ligeramente más costoso en energía y se requieren 2.83 g de glucosa para el mismo propósito (Boote *et al.*, 1998).

Una vez conocidos los costes en equivalentes-glucosa de los seis tipos de compuestos, antes mencionados, y la composición aproximada del tejido, se puede calcular el coste global en equivalentes-glucosa de la síntesis de un gramo de tejido (Penning de Vries y Van Laar, 1982):

$$E = 1 / [2.56*FP + 1.24*FC + 3.11*FF + 2.17*FL + 0.93*FO + 0.05*FM] \quad \text{Ec. 14}$$

Donde,

E = g producto por g de glucosa, y FP, FC, FF, FL, FO y FM son las fracciones de proteína, de celulosa-almidón, de lípidos, de ácidos orgánicos y de minerales, respectivamente, si se considera que todo el nitrógeno procede del ión nitrato.

La eficiencia de conversión del crecimiento (E) es calculada diariamente por el programa para cada uno de los tejidos nuevos, porque el balance de nitrógeno que realiza el modelo permite variar diariamente la composición en proteínas de los tejidos nuevos. Además, la composición en lípidos de las semillas varía con la temperatura.

La cantidad "normal de N" en la composición está incorporado en el archivo-especie para cada componente de la planta, excepto aquella concentración de proteínas de nuevos tejidos que depende del N disponible en relación con la disponibilidad de C. Cualquier cambio en la concentración de proteína es compensado con un cambio en la fracción carbohidrato-celulosa, para conservar la fracción total igual a uno.

2.1.2.5. Reparto de asimilados en función del balance de Carbono

Los algoritmos de reparto de asimilados de CROPGRO son similares a los empleados en SOYGRO V5.42, PNUTGRO V1.02 y BEANGRO 1.0 excepto que el déficit de nitrógeno puede limitar tanto el desarrollo vegetativo como el reproductivo, así como alterar el reparto de asimilados entre la raíz y la parte aérea de la planta. El aumento del peso seco de cada una de las partes de la planta (W_i^+) depende del factor calculado de reparto hacia cada tipo de tejido (X_i), de la eficiencia en la conversión (E), de la fotosíntesis bruta (P_g) y de la respiración de mantenimiento (R_m). El factor de reparto de asimilados varía con la fase de desarrollo del cultivo y la formación de nuevos órganos reproductivos.

$$W_i^+ = X_i * E_i * (P_g - R_m) \quad \text{Ec. 15}$$

- Reparto de asimilados hacia los órganos vegetativos

Antes de la formación de las vainas, como es evidente, toda la producción de asimilados se distribuye entre los diferentes órganos vegetativos (hojas, tallos, y raíces), dependiendo en primer lugar de la evolución fenológica y luego del déficit hídrico y de nitrógeno. A medida que avanza el desarrollo reproductivo, se van formando nuevos sumideros de asimilados y estos progresivamente son asignados, cada vez más, al crecimiento de semillas y vainas. Entonces, la parte de asimilados asignada a los tejidos vegetativos es la que queda una vez que se ha cubierto la demanda de los órganos reproductivos.

- Reparto de asimilados hacia los órganos reproductivos

Desde el estadio de primera vaina, el modelo va incorporando diariamente un conjunto de vainas al sistema (cohortas). Estas representan nuevos sumideros cuya edad fisiológica aumenta mientras transcurre la fase de

crecimiento de la vaina. En un momento dado de esta fase, se produce el cuajado de las semillas en su interior y éstas entran en un periodo de crecimiento rápido. Por tanto, los sumideros reproductivos están formados por diferentes tejidos individuales, cada uno de diferente edad fisiológica y con una demanda potencial de asimilados que es función de la temperatura. El orden de prioridades para distribuir los asimilados es el siguiente: fijación simbiótica de nitrógeno y crecimiento de nódulos, semillas, carpelos, formación de nuevas vainas y en último lugar crecimiento vegetativo. Para tener en cuenta que algunas variedades son verdaderamente indeterminadas y que el crecimiento reproductivo se solapa con el vegetativo, incluso durante la fase de engrosamiento rápido de las semillas, se establece una fracción máxima (XFRUIT) de la proporción de asimilados que pueden acaparar las semillas y las vainas para su crecimiento. De este modo, se reserva una porción de asimilados para el crecimiento vegetativo.

CROPGRO sólo calcula de forma detallada, teniendo en cuenta la fase de desarrollo en la que se encuentran, la dimensión de los sumideros para los tejidos reproductivos: carpelos y semillas. Las hojas con su pecíolo, los tallos, las raíces y los nódulos están, cada uno de ellos, incluidos en un lote, independientemente de su edad fisiológica o de la posición que ocupan en la planta. Para poder calcular la importancia de los sumideros de los órganos reproductivos, es necesario tener una estimación del tamaño potencial de la semilla y de la duración de la fase de llenado de la misma. Se trata de características del cultivar que se incorporan al archivo de coeficientes genéticos. A partir de estos coeficientes genéticos, el programa calcula la tasa potencial de crecimiento de la semilla en condiciones óptimas, mientras que la tasa del nuevo crecimiento de semillas o de las paredes de las vainas (carpelos) será subsecuentemente modificada por la temperatura así como por la disponibilidad de asimilados y de nitrógeno.

CROPGRO es un modelo que está controlado por la producción de asimilados, excepto en tres circunstancias: 1) al principio del desarrollo vegetativo cuando el crecimiento potencial del área foliar y el tamaño de los

sumideros de asimilados pueden ser limitantes y, por tanto, reducir el crecimiento y la fotosíntesis; 2) durante un déficit de nitrógeno pronunciado que limita el crecimiento de los tejidos vegetativos o de las semillas, forzando a los hidratos de carbono a acumularse en los tejidos vegetativos; y 3) si no se han formado suficientes vainas y semillas para utilizar la producción de asimilados.

2.1.2.6. Absorción, balance de Nitrógeno y fijación simbiótica de Nitrógeno respecto del balance de Carbono

Los procesos del balance de N del suelo y de su extracción por las raíces, absorción de N, mineralización, inmovilización, desnitrificación, lixiviación, etc., son simulados en CROPGRO mediante un algoritmo similar al utilizado en el CERES-Wheat (Godwin *et al.*, 1989; Godwin y Jones, 1991). Las extracciones de NO_3^- y de NH_4^+ son función de las concentraciones respectivas de estos iones, de la disponibilidad de agua y de la densidad de raíces en cada uno de los horizontes del suelo. Si la disponibilidad de nitrógeno es superior a la demanda, se limitan las extracciones a cantidades iguales o inferiores a la demanda de nitrógeno. La demanda total del cultivo se calcula a partir del incremento en peso de cada tipo de órgano, multiplicado por la concentración máxima de N admitida para cada parte de la planta. Esto último viene especificado en el archivo que define las características de la especie.

En CROPGRO, se ha incorporado un módulo que simula la fijación simbiótica de nitrógeno. El momento en que se empieza a acumular biomasa en los nódulos está regulado por la acumulación de un tiempo térmico mínimo. Cuando las extracciones de nitrógeno son suficientes para cubrir la demanda, el crecimiento de los nódulos es bajo, por recibir una mínima parte de los asimilados asignados a las raíces. Cuando las extracciones son insuficientes para cubrir la demanda de los nuevos tejidos, se utilizan hidratos de carbono en la fijación simbiótica de nitrógeno en función de la masa de los nódulos y de las características predeterminadas de la especie. Si la masa de los nódulos es

insuficiente para cubrir la demanda de nitrógeno, entonces se orienta parte de los asimilados hacia el crecimiento de los nódulos, con una tasa que es función de la temperatura del suelo y de la especie. La tasa de fijación de N_2 está además influenciada por el déficit hídrico del suelo, así como la aireación del mismo y también por el estadio de desarrollo de la planta (Boote *et al.*, 1998).

2.1.2.7. Consecuencias del déficit de Nitrógeno sobre el crecimiento, la fotosíntesis, el reparto de asimilados y la composición de la biomasa

Cuando la suma de las extracciones de nitrógeno y de la fijación simbiótica de nitrógeno es inferior a la demanda, los tejidos vegetativos siguen creciendo inicialmente a la velocidad potencial pero se produce una dilución de su concentración de nitrógeno. Debido a la disminución de concentración de nitrógeno de las hojas se produce una disminución en la fotosíntesis foliar y del dosel, siguiendo una función cuadrática desde el máximo hasta el mínimo de concentración foliar. En el archivo de características de cada especie, se define una concentración mínima de nitrógeno de un nuevo tejido, por debajo de la cual la tasa de crecimiento disminuye progresivamente para mantener constante esa concentración mínima. Cuando la concentración de los tejidos está cercana al límite inferior, el crecimiento vegetativo es reducido y los carbohidratos comienzan a acumularse en los tejidos vegetativos. En esta situación, los hidratos de carbono excedentes se orientan hacia el crecimiento y el funcionamiento de los nódulos. Además, cuando el déficit de nitrógeno es severo (la disponibilidad de N es inferior a la mitad de la demanda), el reparto de asimilados se modifica, incrementándose la proporción asignada a las raíces.

CROPGRO tiene en cuenta la composición en proteínas y lípidos de las semillas por cambios en el suministro de N y C. Cuando el suministro de N es más deficiente que el de C, la concentración de N (proteínas) de las semillas

tiende a declinar, y aumenta cuando el suministro de C es más deficiente que el de N.

2.1.2.8. Removilización del Nitrógeno y de los hidratos de carbono, senescencia y madurez

CROPGRO permite la acumulación de reservas de hidratos de carbono en hojas y tallos bajo diferentes circunstancias: 1) cuando la falta de nitrógeno limita el crecimiento, 2) cuando no hay suficiente demanda durante el principio del ciclo o cuando se ha fijado el número definitivo de semillas y 3) durante el periodo que transcurre desde el inicio de la floración hasta el momento en que comienza la fase de crecimiento rápido de las semillas. En este último periodo, puede ser destinado a la acumulación de carbohidratos en tallos y hojas, hasta un máximo del 30% del crecimiento vegetativo diario. Por otro lado, la translocación de hidratos de carbono desde tejidos viejos hacia tejidos nuevos, puede producirse durante todo el ciclo, pero el modelo permite un aumento de su tasa durante la fase de crecimiento de las semillas. Así, la tasa de movilización de proteínas es lenta mientras el crecimiento es solamente vegetativo, pero puede llegar a multiplicarse por dos cuando las semillas empiezan a engrosarse. Esta removilización de proteínas permite a la planta aumentar su ritmo diario de producción de semillas, pero conlleva una caída de la concentración de nitrógeno en las hojas, proceso autodestructor que ocasiona tanto una reducción de la fotosíntesis de la cubierta como una pérdida progresiva de hojas por abscisión. A la disminución proteica de las hojas y de los tallos, va asociada también la pérdida de masa no proteica, reduciéndose en consecuencia el área foliar, el peso de hojas y tallos y sus respectivas proteínas.

La senescencia de las hojas depende en primer lugar de la removilización de las proteínas pero se ve acelerada por el déficit hídrico; esto conduce a una senescencia gradual pero el proceso se ve acelerado a partir de la madurez

fisiológica (R7) (Fehr y Caviness, 1977), provocando la abscisión de prácticamente todas las hojas.

2.1.2.9. Balance hídrico del suelo, crecimiento de las raíces y evapotranspiración

El modelo seguido para simular el balance hídrico del suelo fue descrito por Ritchie (1985), y es el mismo que se emplea en todos los modelos del DSSAT. En él, el perfil del suelo está dividido en un cierto número de horizontes, y el contenido de agua diario de cada uno de estos horizontes varía entre un límite inferior, punto de marchitez permanente, y un límite superior, que corresponde a la capacidad de campo. Si el contenido en agua de un determinado nivel está por encima del límite superior de drenaje, entonces se considera que el excedente de agua es drenado hacia el horizonte inferior y se utiliza un coeficiente de drenaje que viene definido para cada horizonte en el archivo de características del suelo (SOIL.SOL). Para calcular tanto la infiltración como la escorrentía del agua procedente de precipitaciones o de riegos, se utilizan las curvas establecidas por el "Soil Conservation Service" (SCS). En ciertas circunstancias, el drenaje puede verse limitado por la conductividad hidráulica a saturación y algunos horizontes pueden estar saturados durante ciertos periodos. Esto puede originar una reducción de la densidad de raíces en estos horizontes, y una disminución tanto de las extracciones de agua como de la fijación simbiótica de nitrógeno.

Tanto la masa, como la longitud de raíces de cada uno de los horizontes son variables de estado que calcula diariamente el programa de simulación. La longitud de raíces generada durante el día depende de la cantidad de asimilados destinada al crecimiento subterráneo y de un parámetro que define la cantidad de masa que contiene una unidad de longitud de raíz. La asignación de la longitud de raíces nuevas generadas a los diferentes horizontes, dependerá de tres factores: 1) de la progresión en profundidad del frente

radical, 2) de una función de distribución preferencial de distribución de las raíces en cada uno de los horizontes del suelo, y 3) del contenido en agua de cada una de las zonas. Si la fracción de agua disponible de un horizonte es inferior a 0.25 de la potencial, el modelo tiene en cuenta una reducción del crecimiento de las raíces en este horizonte. Por esto, las raíces tienden a crecer más rápidamente en los horizontes húmedos que en los secos. El modelo también tiene en cuenta una reducción del alargamiento de las raíces en cuanto el suelo está cercano a la saturación. Las mismas circunstancias que frenan el crecimiento radical, estimulan la senescencia de las raíces.

- Opciones para el cálculo de la evapotranspiración de referencia y extracción del agua por las raíces

El modelo CROPGRO permite escoger entre dos opciones para calcular la evapotranspiración potencial o de referencia del cultivo (ET_0 , mm d^{-1}): (1) Priestley-Taylor (Ritchie (1972, 1985); PT), y (2) Penman-Monteith-FAO56 (Allen *et al.* (1998); PM-FAO56)

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 temperaturas mínimas y máximas). PM-FAO56 (2) requiere además, datos diarios de la temperatura del punto de rocío y de la velocidad del viento. Tanto con PT como con PM-FAO56, el modelo utiliza una función exponencial del índice de área foliar (IAF) para separar la transpiración potencial del cultivo de la evaporación de agua del suelo.

La capacidad de suministro de agua del sistema suelo-raíces es función de la densidad de raíces y de la humedad de cada uno de los horizontes. Se calcula ésta y se compara con la evapotranspiración del cultivo. El modelo considera que la extracción de agua es igual a la menor de las dos magnitudes, evapotranspiración y extracción potencial de agua del cultivo.

- Efecto del déficit hídrico sobre los procesos

Los procesos simulados por CROPGRO que son sensibles al déficit hídrico son los siguientes: fotosíntesis, transpiración, fijación simbiótica de nitrógeno, expansión de las hojas (al disminuir la superficie específica de las hojas (SLA)), tasa de aparición de hojas, alargamiento de los entrenudos y reparto de asimilados hacia la parte subterránea del cultivo. Cuando la extracción de agua por las raíces no consigue cubrir la demanda del cultivo, entonces, la fotosíntesis del cultivo se ve reducida en la misma proporción que la extracción de agua respecto de la demanda. La disminución de la tasa de aparición de hojas, de la SLA, del alargamiento de los entrenudos y el aumento de la proporción de asimilados orientados hacia las raíces se inicia de forma más precoz (al tratarse de procesos más sensibles a la sequía), ya que se produce cuando la relación entre la extracción de agua por las raíces y la evapotranspiración potencial del cultivo cae por debajo de 1.5. Por otro lado, la velocidad de avance del frente de raíces se ve estimulada por la escasez de agua a partir de una relación inferior a 1, mientras que, cuando la proporción de agua disponible en los horizontes superficiales (5-40 cm de profundidad) disminuye por debajo de un valor umbral, la fijación simbiótica de nitrógeno se ve reducida. Además, cuando la demanda evapotranspirativa no puede ser satisfecha en su totalidad por las extracciones de agua por las raíces, la senescencia de las hojas se acelera.

2.1.3. Datos necesarios para correr el modelo

Para correr el modelo, se necesita introducir un archivo climático estándar (*.WTH), compatible con todos los demás modelos de simulación del DSSAT (Hoogenboom *et al.*, 1994) con los siguientes datos climáticos diarios: radiación global (MJ m^{-2}), temperatura máxima y mínima del aire ($^{\circ}\text{C}$) y precipitación (mm). Además, para poder correr la opción del balance hídrico de agua utilizando las ecuaciones de Penman-Monteith-FAO56 (Allen *et al.*, 1998), hay que poder contar con los datos de recorrido diario del viento (km día^{-1}) y de temperatura del punto de rocío ($^{\circ}\text{C}$).

Los datos de suelo necesarios para poder utilizar CROPGRO pueden ser extraídos de las publicaciones del “U.S. Soil Conservation Service” (SCS) o medidos directamente en el suelo. A partir de estos datos mínimos, el subprograma que facilita la creación del archivo de suelo (SOIL.SOL) estima la mayor parte de las características de suelo necesarias para poder correr con éxito el balance hídrico del suelo.

Las prácticas de cultivo de los diferentes tratamientos que se quieren simular tienen que ser introducidas en un archivo específico, que en el programa DSSAT se llama “File X”. En este archivo, se especifican características de manejo como las siguientes: fecha de siembra, distancia entre líneas, densidad de plantas, fertilización (fecha, abono empleado, cantidad,...), riego (fecha, cantidad, método de aplicación,...), residuos vegetales incorporados al suelo antes del inicio del ciclo simulado, etc.

El resumen de datos necesarios para funcionar se encuentra en la **Tabla 25**.

2.1.4. Salidas de CROPGRO

El programa genera archivos estándar para los resultados finales de las simulaciones (OVERVIEW.OUT, SUMMARY.OUT), así como para los procesos simulados a lo largo del ciclo como el crecimiento (GROWTH.OUT), el balance hídrico (WATER.OUT), el de nitrógeno (NITROGEN.OUT) y el balance de carbono (CARBON.OUT). Todos estos archivos son leídos de forma automática por el programa de gráficos asociado al DSSAT, lo que permite representar la evolución de todas las variables de estado simuladas en función del tiempo para los diferentes tratamientos definidos en el archivo "File X". Además, el programa de gráficos facilita la comparación de los resultados de la simulación con los datos experimentales, cuando estos existen y han sido introducidos previamente en los archivos estándar ("File T: datos medidos a lo largo del ciclo; File A: datos medidos en cosecha") previstos para tal efecto en el programa DSSAT.

Tabla 25.- Datos de entrada del modelo CROPGRO.

Tipo de DATOS	DATOS
Climáticos (diarios)	Latitud (°, hemisferio) Radiación solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) Precipitaciones (mm día^{-1}) Temperatura máxima del aire ($^{\circ}\text{C}$) Temperatura mínima del aire ($^{\circ}\text{C}$)
Edáficos (cada horizonte)	Coeficiente de reflectividad (albedo del suelo) Humedad de saturación (%v) Humedad del límite de drenaje (%v) Humedad de marchitez permanente (%v) Drenaje (curva) Distribución de raíces entre horizontes Escurrimiento (curva)
Manejo del cultivo	Cultivar Fecha de siembra Densidad (pl. m^{-2}) y distancia entre líneas (m) Fertilización (fecha, abono y cantidad kg ha^{-1}) Irrigación (fecha, método y cantidad mm día^{-1})

Fuente: Hoogenboom *et al.* (1990)

2.1.5. Adaptación de CROPGRO para simular el crecimiento del cultivo de haba

Boote *et al.* (2002) adaptaron el CROPGRO para simular el crecimiento del haba (*Vicia faba* L.). Estos autores describieron el proceso de adaptación del modelo para una nueva especie, lo que cual puede servir de ejemplo para muchos modelos mecanicistas.

Para adaptar el modelo CROPGRO a la simulación del cultivo de haba, se utilizó la versión de CROPGRO-dry bean como punto de partida y se siguieron dos estrategias para desarrollar los archivos especie y cultivar:

1.- valores y relaciones descritos en la literatura, 2.- comparación con datos obtenidos experimentalmente en el cultivo de haba en Córdoba, España (Sau y Mínguez, 2002).

Para lograr la adaptación del modelo, en primer lugar se buscaron datos en la bibliografía sobre la composición de tejidos, T_b (temperatura base) y T_{opt} (temperatura óptima) para los procesos, y concentración crítica de N para la fotosíntesis. Algunas relaciones obtenidas en la literatura fueron posteriormente modificadas por comparación con los datos experimentales. En segundo lugar, se ajustaron los datos de días fototérmicos para predecir correctamente el ciclo del cultivo, floración, y fecha de madurez. Este proceso se complementó con datos de distintos cultivares provenientes de Francia y por comparación de la fenología observada en distintas fechas de siembra para un cultivar específico (Alameda) en España.

Tercero, la predicción en acumulación de biomasa y IAF se comparó con valores observados en Córdoba en condiciones no limitantes del medio, usando datos de clima y de manejo, obtenidos en los ensayos para la calibración de parámetros de fotosíntesis y de crecimiento foliar.

Cuarto, las comparaciones entre los datos simulados y observados de crecimiento de vainas e incremento en el índice de cosecha se hicieron

conjuntamente con la evaluación del reparto de materia seca en hojas, tallos, y vainas.

Se ajustaron otras características fenológicas del cultivo, como el tiempo desde floración a primera vaina, floración a formación de semillas y también la duración del llenado de vainas.

Quinto, el crecimiento de los nódulos, concentración del N en hoja, y declinación en N durante el llenado de granos se evaluaron, y se ajustaron los parámetros y la sensibilidad a la temperatura que afecta el crecimiento de los nódulos, la fijación de N atmosférico y la movilización de N.

Sexto, se ajustaron los parámetros relacionados con el tamaño de semillas, número de semillas por vaina y la tasa de crecimiento de semilla y su duración para reproducir correctamente el tamaño de semilla, así como la duración del crecimiento de semillas. El proceso de adaptación fue exitoso, y el CROPGRO-fababean se encuentra disponible en la nueva versión del DSSAT pero, por tratarse de un modelo nuevo, no ha sido calibrado en otros entornos agroclimáticos. Además, muchos de sus parámetros, al proceder de la literatura deben ser contrastados.

2.1.6. Parámetros de submodelo de fenología de CROPGRO-fababean

En la presente versión de CROPGRO-fababean (Boote et al., 2002), los coeficientes correspondientes a la duración de las fases del cultivo, así como la tasa de aparición de hojas por día fisiológico (TRIFOL) (**Tablas 23 y 26**) fueron calibrados con los datos de los ensayos de campo realizados en Córdoba, en el sur de España (Mínguez *et al.*, 1993; Sau y Mínguez, 2000). Si embargo, las temperaturas cardinales que afectan la fenología fueron derivadas de la literatura científica (Evans, 1959; Manschadi *et al.* 1998a; Qi *et al.*, 1999; Stutzel, 1995 a,b).

Qi *et al.* (1999), en ensayos realizados en invernaderos con ambiente controlado con cultivares de Bolivia y Nepal y empleando temperaturas medias, obtuvieron T_b comprendidas entre -0.1 y 0.6 °C para la emergencia, y -1.1 y -1.9 °C para la tasa de aparición de hojas. Mostraron también que la tasa máxima de aparición de hojas se alcanzaba con 27 °C, pero no hubo tratamientos con temperaturas superiores. Por su lado, la base de datos de Evans (1959) fue obtenida en cámaras de crecimiento. Como la anterior, también fue analizada considerando las temperaturas medias y los resultados obtenidos mostraron una T_{opt1} (primera temperatura óptima) de 23 °C con una ligera tendencia a disminuir la tasa de formación de nudos a 26 °C. Manschadi *et al.* (1998b), apoyándose en datos no publicados, adoptó para su modelo, una T_b de 1.5 °C desde germinación hasta emergencia.

Para el desarrollo hacia la floración, Evans (1959) propuso una T_{opt1} de 22 y 17 °C para cultivares de invierno franceses y Bullock, respectivamente, así como una disminución de la tasa para temperaturas superiores a 22 °C. Como todas estas temperaturas cardinales fueron obtenidas con datos de temperatura media en ensayos bajo condiciones controladas, los valores obtenidos pueden no tener el mismo significado que los que se usan en modelos que trabajan con temperaturas horarias en condiciones de campo, y por tanto pueden causar distorsiones en las predicciones de fenología. También es necesario señalar que los trabajos de Qi *et al.* (1999) no tuvieron tratamientos de temperatura por debajo de 16.8 °C, y en consecuencia sus estimaciones de T_b no pudieron ser muy precisas.

Aunque se suele asumir que *Vicia faba* L. es una especie de día largo, Evans (1959) es uno de los pocos trabajos que propone valores para la longitud crítica del día (CLDL), así como la sensibilidad del ciclo al fotoperiodo (PPSEN). En su trabajo, los días para la floración disminuyen de modo lineal a una tasa similar para una amplia gama de tipos de cultivares de habas a medida que el día se alarga por encima de 8 horas, variando la longitud crítica entre 8 y 24 horas entre tipos.

Los valores que aparecen por defecto al ejecutar el CROPGRO-fababean para CLDL y PPSEN (**Tabla 26**), se obtuvieron utilizando datos de los ensayos realizados en Córdoba (citados anteriormente) y una base de datos complementaria con diferentes fechas de siembra obtenida en (Lugo, España) (Boote *et al*, 2002).

Como uno de los objetivos de este trabajo era poder utilizar CROPGRO-fababean para obtener predicciones fiables bajo condiciones, proponemos que la mejor forma de obtener los coeficientes correspondientes al submodelo de fenología (**Tabla 26**) es mediante un proceso de calibración y validación del modelo apoyándose en una amplia base de datos obtenida en campo bajo condiciones variables, diaria y estacionalmente, empleando una metodología similar a la utilizada de modo satisfactorio por Grimm *et al.* (1993) para calibrar el modelo SOYGRO para predecir la fecha de floración de diferentes cultivares.

Tabla 26. Parámetros originales del submodelo fenológico del CROPGRO-fababean

a.- Temperaturas cardinales: temperatura base (Tb), primer óptimo (Topt1), segundo óptimo (Topt2), y Temperatura máxima (Tx)

Proceso de desarrollo	Tb (°C)	Topt1 (°C)	Topt2 (°C)	Tx (°C)
Tasa de expresión de nudos	0	27	30	40
Desarrollo reproductivo hasta primera semilla	0	22	26	45
Desarrollo desde primera semilla hasta madurez	0	22	35	45

b.-Coeficientes genéticos

	Símbolo	Valor
Longitud crítica del día por encima de la cual el desarrollo reproductivo no es afectado por la longitud del día	CLDL	24.0 h
Pendiente de la respuesta relativa de desarrollo vs. fotoperíodo	PP-SEN	-0.031 1/h
Tasa de aparición de hojas o nudos en el tallo principal	TRIFOL	0.35 hoja/ DT
Tiempo desde el final de la fase juvenil a la primera flor	EM-FL	18.0 DPT
Tiempo desde la primera flor a la primera vaina	FL-SH	11.0 DPT
Tiempo desde la primera flor a la primera semilla	FL-SD	26.0 DPT
Tiempo desde la primera semilla a madurez fisiológica	SD-MF	31.8 DPT
Tiempo desde la primera flor al final del crecimiento de hojas	FL-LF	45.0 DPT

DT: días térmicos; DPT: días fototérmicos; Fuente: Boote *et al.* (2002)

2.1.7. Objetivos

Evaluar la capacidad predictiva de la fenología del modelo CROPGRO-fababean (Boote *et al.*, 2002) e indicar las posibles modificaciones necesarias para predecir correctamente el desarrollo del cultivo de haba en un amplio rango de fechas de siembra en las condiciones agroclimáticas de Lugo, Galicia, España.

En concreto, se pretende calibrar y validar los principales parámetros usados por CROPGRO-fababean para predecir:

1. la evolución temporal del número de hojas del cultivo (TRIFOL, Tb, Topt1 y Topt2)
2. la fecha de floración (EM-FL, Tb, Topt1 y Topt2)
3. la fecha inicio de vainas (FL-SH, Tb, Topt1 y Topt2)
4. y la de madurez fisiológica (SH-MF, Tb, Topt1 y Topt2)

(ver definiciones de parámetros en **Tablas 22, 23 y 26**)

2.2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.2.1. Modelos y datos empleados

Para alcanzar objetivo se empleó el modelo CROPGRO-fababean, incluido en el DSSAT 4.0 (Boote *et al.*, 2002), así como una base de datos del desarrollo fenológico obtenida en ensayos de campo bajo un amplio rango de temperaturas y fotoperíodo durante el ciclo del cultivo. Esta base de datos está constituida por los datos de fenología de los tres años descritos en el Capítulo 1, con el agregado de dos siembras extras durante el segundo año. En estos ensayos, el número de nudos del eje principal (hojas expandidas) fue determinado visualmente tres veces por semana y además se marcaron también las fechas de emergencia, floración, inicio de formación de vainas y madurez fisiológica; todos ellos estadios fenológicos importantes en CROPGRO, ya que estos eventos desencadenan cambios en el reparto de asimilados. (Ver Material y métodos del Primer Capítulo).

Los datos de los dos primeros años experimentales fueron utilizados para la calibración de los parámetros, mientras el tercer año fue usado para validar el proceso de calibración. Las dos fechas de siembra agregadas durante el segundo año fueron una temprana, sembrada el 1 de septiembre de 2005 y otra tardía sembrada el 19 de junio de 2006. El cultivo correspondiente a la fecha de siembra del 1 de septiembre de 2005 murió por las bajas temperaturas del mes de diciembre de aquel año (se alcanzó una temperatura mínima diaria $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$, presentándose varios días con temperaturas por debajo de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ antes de la muerte de las plantas). En esta fecha de siembra, si bien las temperaturas alcanzadas permitieron la expansión foliar y la floración, no se

produjo la fase de inicio de vainas y las plantas permanecieron en la fase de floración hasta su muerte.

Se analizaron las posibles causas de este mantenimiento de la fase, determinándose una disminución de la viabilidad del polen por conteo en microscopio de fluorescencia de los granos de polen teñidos con diacetato de fluoresceína (FDA) al microscopio de fluorescencia. Esta técnica permite observar los granos viables con una fluorescencia amarilla verdosa, mientras los no viables se muestran opacos (datos no mostrados) (Heslop-Harrison *et al.*, 1984). El efecto de la disminución en la viabilidad de los granos de polen atribuible a las bajas temperaturas, estuvo magnificada por el efecto de la ausencia temporal del polinizador natural de este cultivo en esta región, *Bombus sp.*, que, en estos meses de año, ha empezado el período de hibernación.

Las temperaturas cardinales que regulan la tasa de expansión de hojas y el parámetro TRIFOL (ver **Tabla 26**) fueron evaluados comparando las predicciones del n° de hojas que estiman las correspondientes funciones del modelo CROPGRO-fababean con los parámetros originales ($TRIFOL = 0.35 \text{ h DT}^{-1}$), $T_b = 0 \text{ °C}$, $T_{opt1} = 27 \text{ °C}$, $T_{opt2} = 30 \text{ °C}$, $T_x = 40 \text{ °C}$ (Boote *et al.*, 2002) (**Tabla 26** y **Figura 10**) con las obtenidas por medio de multitud de combinaciones de variaciones de estos parámetros obtenidas de modo automático (ver apartado 2.1.1.1) para determinar los más adecuados para obtener estimaciones correctas.

Cada día, el modelo estima las temperaturas horarias a partir de las temperaturas máximas y mínimas diarias, y a continuación, después de estimar el fotoperiodo correspondiente en función de la latitud y del día del año, calcula el tiempo térmico o fototérmico requerido para cada fase del cultivo.

El método utilizado para el cálculo de las temperaturas horarias fue desarrollado por Parton y Logan (1981). En este método, el día se encuentra dividido en dos segmentos y utiliza una curva seno-truncada para el día y una de decrecimiento exponencial de la temperatura nocturna. Las temperaturas horarias están determinadas por las ecuaciones 16 y 17:

a.- Para las horas del día:

$$T(h) = (T \text{ max} - T \text{ min}) * \text{seno}\left(\frac{\Pi * m}{y + 2 * a}\right) + T \text{ min} \tag{Ec. 16}$$

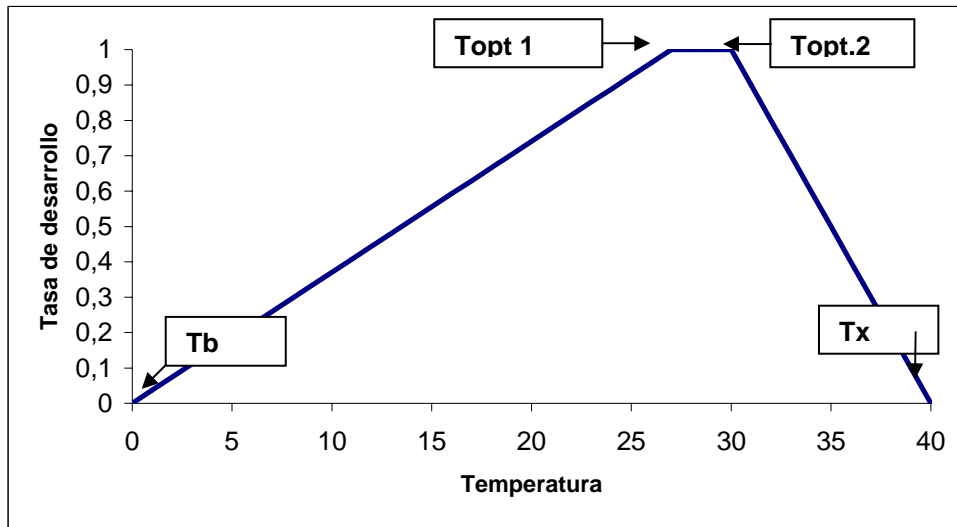


Figura 10.- Temperaturas cardinales del modelo CROPGRO-fababean original para la tasa de aparición de hojas.

b.- Para las horas de la noche:

$$T(h) = T \text{ min} + (T \text{ psol} - T \text{ min}) * \exp\left(-\frac{b * n}{z}\right) \tag{Ec. 17}$$

Donde,

$T(h)$: temperatura (°C) de una hora determinada del día o de la noche, limitadas por m y n

$T \text{ max}$: temperatura máxima diaria (°C)

$T \text{ min}$: temperatura mínima diaria (°C)

y: duración del día (h)

z : duración de la noche (h)

T_{psol} : temperatura de la puesta de sol ($^{\circ}\text{C}$)

m : número de horas entre el tiempo de ocurrencia de T_{min} y la puesta de sol (h)

n : número de horas desde la puesta de sol hasta el tiempo de ocurrencia de T_{min} (h)

a : coeficiente de retardo para $T_{max} = 1.80$ (h)

b : coeficiente de temperatura nocturna = 2.20

c : tiempo de retardo de T_{min} desde el momento de la salida del sol.

En cada fecha de siembra, el cómputo de las hojas se inició en la fecha medida de la emergencia (n° de hojas = 0 en emergencia).

2.2.1.1. Estrategias para la optimización de los parámetros

Con el objetivo de calibrar el modelo buscando los coeficientes que permitan mejorar el modelo CROPGRO-fababean, se utilizó el modelo mismo como una herramienta para la optimización de los coeficientes que regulan las temperaturas cardinales y el fotoperíodo, los que a su vez afectan los procesos vegetativos y reproductivos. El hecho de usar el modelo como una herramienta de optimización fue importante ya que, como se describe anteriormente, el modelo usa una función de temperatura más sofisticada que la función de tiempo térmico que utiliza la temperatura media para afectar a la tasa de desarrollo.

Determinar los valores óptimos de los parámetros de una simulación mediante iteraciones, en los que el investigador va cambiando sucesivamente dichos valores en los archivos correspondientes, puede requerir un tiempo de computación excesivo, ya que el número de combinaciones posibles puede ser

muy alto. Por eso, muchos investigadores en los últimos años han desarrollado distintos métodos para tratar de optimizar simulaciones mediante técnicas automáticas o semiautomáticas, es decir buscar valores óptimos o cercanos al óptimo de los parámetros de entrada mediante un programa de ordenador que varía el valor de los coeficientes mediante criterios preestablecidos. Uno de esos métodos es el temple simulado (simulated annealing) (Goffe *et al.*, 1994). Se trata, tal como se describió en el apartado 2.1.2.1 de la introducción de este capítulo, de un algoritmo de aproximación a la solución óptima, fundamentado en la analogía con el comportamiento de sistemas termodinámicos simples. Este programa fue conectado con el CROPGRO, y así los dos ejecutables compartieron archivos.

El programa CROPGRO muestra la salida de las simulaciones, ya sea del número de nudos en un día determinado del año o la salida de la simulación de la fecha de floración o de otro estadio reproductivo. Estos valores son luego utilizados por el programa de optimización para calcular el error suma de cuadrados (SSE) de la simulación frente a los valores observados (un archivo de valores observados es ofrecido al programa de optimización).

El programa de optimización incluye los parámetros iniciales, así como los distintos pasos en la modificación de los mismos. El programa temple simulado calcula, mediante un consistente método de azar, la modificación de los parámetros que luego se muestran en un archivo de salida, PARM.DAT que será leído por el CROPGRO. El programa de optimización después de cada paso enumera los valores de los parámetros y su correspondiente SSE.

En cada proceso de optimización de los parámetros del modelo, las simulaciones se detienen después de un número suficiente de pasos para permitir que la suma de cuadrados alcance el mínimo valor estable posible y, a continuación, se obtiene la media y la desviación estándar de los parámetros correspondientes a los 200 mejores ajustes. El número mínimo de simulaciones requeridas del programa se incrementa con el número de parámetros a optimizar, pasando sucesivamente de 2500 a 8000, 15000, 24000, 32000 y 50000 para uno, dos, tres, cuatro, cinco y seis parámetros, respectivamente.

El programa de temple simulado acoplado a las salidas del modelo cuyos parámetros se pretenden optimizar, ya ha sido utilizado con éxito con modelos de cultivo del DSSAT (Calmon *et al.*, 1999; Lizaso *et al.*, 2001).

2.2.1.2. Estimadores del ajuste de los modelos

Con el fin de obtener una ilustración cualitativa y cuantitativa del grado de ajuste de los modelos, se utilizaron representaciones gráficas 1:1 (simulado *versus* medido) y se calcularon los coeficientes a y b de la regresión lineal.

Por otro lado, para cuantificar la mejora conseguida en el proceso de optimización de parámetros (aumento de precisión), se calcularon la suma de cuadrados del error (SSE), la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) y un índice de ajuste (d ; Willmott, 1982), empleando las tres ecuaciones siguientes:

$$SSE = \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \quad \text{ec.18}$$

$$RMSE = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 / (n - 1) \right)} \quad \text{ec.19}$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i'| + |O_i'|)^2} \right], \text{con } 0 \leq d \leq 1, \quad \text{ec.20}$$

En que,

n: número de observaciones; \bar{O} : valor medio observado de la variable; O_i y P_i : valores observados y estimados del i-ésimo par de datos, respectivamente, $P_i' = P_i - \bar{O}$ y $O_i' = O_i - \bar{O}$.

En la etapa de validación del modelo, el RMSE se denomina RMSEP (raíz cuadrada del error cuadrático medio de predicho) ya que en esta instancia el modelo tiene los parámetros calibrados y se estima la predicción del error con datos independientes a los utilizados en la etapa de calibración.

2.2.1.3. Tasa de expansión de hojas: calibración y validación

Para calibrar los parámetros correspondientes a proceso de emisión de hojas sobre el tallo principal de la planta, se utilizaron 240 observaciones (nº de hojas expandidas, días después de emergencia), aproximadamente unas 20 observaciones por cada una de las 8 fechas de siembra utilizadas para el proceso de calibración. Esto proporcionó un sólido conjunto de datos, recogidos en un amplio rango de temperaturas (por decenios la temperatura media diaria se situó entre 2.3 y 22.6 ° C), atribuible tanto a las oscilaciones de temperatura diarias como a las variaciones estacionales (**Tabla 27**), para calibrar las distintas opciones del modelo para predecir correctamente el momento de expansión de las hojas en el tallo principal desde la emergencia.

El tercer experimento (105 observaciones) se utilizó para testar las distintas versiones contra un conjunto de datos independientes. Tanto para la calibración como la validación, la fecha de siembra y la profundidad fueron manipuladas para predecir la fecha correcta de emergencia de cada tratamiento. Esto se hizo, porque no teníamos plena confianza en la temperatura del suelo que el modelo utiliza para predecir la fecha exacta de emergencia.

Tabla 27. Temperatura media (T_m) cada 10-11 días para el período experimental de cada año, desde 2004 hasta 2007.

	<u>2004-2005</u> T _m (°C)	<u>2005-2006</u> T _m (°C)	<u>2006-2007</u> T _m (°C)
Septiembre 1-10	--	17.5	--
Septiembre 11-20	--	16.5	--
Septiembre 21-30	--	16.3	--
Octubre 1-10	--	15.1	--
Octubre 11-20	--	13.0	--
Octubre 21-31	10.9	14.2	15.1
Noviembre 1-10	10.7	10.2	13.6
Noviembre 11-20	6.6	9.4	10.1
Noviembre 21-30	6.2	6.1	9.7
Diciembre 1-10	4.0	7.5	8.4
Diciembre 11-20	7.6	4.6	5.3
Diciembre 21-31	5.0	3.3	5.6
Enero 1-10	5.5	5.8	9.2
Enero 11-20	8.3	5.4	8.7
Enero 21-31	4.6	4.2	3.4
Febrero 1-10	5.4	5.7	6.6
Febrero 11-20	5.9	6.8	8.4
Febrero 11-28	2.3	3.1	9.3
Marzo 1-10	3.3	7.1	10.2
Marzo 11-20	11.9	11.3	8.7
Marzo 21-31	11.9	11.9	6.6
Abril 1-10	10.9	11.9	8.9
Abril 11-21	8.6	10.4	13.6
Abril 21-30	12.3	12.8	13.4
Mayo 1-10	13.8	12.5	12.9
Mayo 11-20	12.3	16.1	13.3
Mayo 21-31	14.6	14.5	13.2
Junio 1-10	18.1	17.8	17.4
Junio 11-20	20.1	18.6	15.8
Junio 21-30	19.3	17.9	14.7
Julio 1-10	17.9	19.5	17.0
Julio 11-20	21.1	22.6	17.3
Julio 21-31	18.7	20.4	18.8
Agosto 1-10	19.4	20.5	18.5
Agosto 11-20	19.2	16.7	16.7
Agosto 21-31	18.9	19.8	18.2

Como ya se describió en 2.1.1.3, la tasa de expansión de hojas que el CROPGRO-fababean muestra por defecto (Boote *et. al.*, 2002) depende de la temperatura horaria calculada y de cinco parámetros derivados de la literatura: (TRIFOL = 0,35 hoja/DT (tasa de aparición de hojas en el tallo principal: hojas por días térmicos), $T_b = 0$ ° C, $T_{opt1} = 27$ ° C, $T_{opt2} = 30$ ° C, $T_x = 40$ ° C). Se inicializó el proceso de optimización de los parámetros con los valores correspondientes que aparecen por defecto en el modelo CROPGRO-fababean (Boote *et al.*, 2002), para luego modificarlos progresivamente (para resolver) uno (TRIFOL), dos (TRIFOL y T_b), tres (TRIFOL, T_b y T_{opt1}), y luego cuatro (TRIFOL, T_b , T_{opt1} y T_{opt2}) parámetros en relación con su valor fijo. El único parámetro que no se trató de estimar fue T_x , ya que su valor es muy superior a la gama de temperaturas observadas durante los experimentos. El objetivo fue evaluar las sucesivas mejoras en comparación con el modelo inicial (parámetros fijados; modelo 1 en la **Tabla 28** de Resultados y Discusión) y determinar la necesidad de incorporar la mejora provocada por el cambio de un determinado parámetro.

Después de resolver un problema, ligado a la aparición de la primera hoja, que se detectó en el modelo original (ver Resultados y Discusión, modelo 2 en **Tabla 28**), se optimizó TRIFOL variando sólo este parámetro (modelo 3 en **Tabla 28**) y manteniendo todos los demás parámetros en sus valores iniciales. El segundo enfoque que se empleó fue optimizar dos parámetros (TRIFOL y T_b). En este caso se hizo con dos valores fijos de T_{opt1} (23 ° C (modelo 4 en la Tabla 28) y 27 ° C (modelo 5 en Tabla 28)), porque hay cierto desacuerdo en la T_{opt1} en la literatura. En tercer lugar, hemos optimizado tres parámetros, (TRIFOL, T_b , T_{opt1}) con un fijo T_{opt1} a 23 ° C (modelo 6 en la Tabla 27). El cuarto intento tuvo por objeto resolver el modelo para cuatro coeficientes (TRIFOL, T_b , T_{opt1} , y T_{opt2}) sin considerar el efecto de la longitud del día, igual que en los casos anteriores (modelo 7 en Tabla 28). El último enfoque empleado se realizó considerando hasta seis coeficientes que incluían a CLDL y PPSEN, además de los anteriores, lo cual permitió que la tasa de expansión

de hojas fuese parcialmente sensible a la longitud del día (modelos 8 a 16 en Tabla 28).

2.2.1.4. Fase reproductiva: calibración y validación

Para la calibración de los parámetros relacionados con una determinada fase fenológica reproductiva se utilizaron, en función de la fase fenológica concreta) 12 o 11 observaciones correspondientes al primer y segundo año experimental. Se calibró la floración (FL; 12 datos), primera vaina (SH; 11 datos), y la madurez fisiológica (MF; 11 datos). Para los estadios posteriores a la floración, sólo se disponían 11 datos ya que la fecha de siembra del 1 de septiembre de 2005 murió por causa de una fuerte helada (21/12: -4.9 °C) antes del cuajado de la primera vaina, por lo que los posteriores estadios fenológicos no fueron registrados. Para el proceso de validación se utilizaron cinco observaciones del tercer año experimental. Por tratarse de un número escaso de observaciones, la optimización pudo verse algo limitada, sobre todo para estudiar los efectos tanto de la temperatura como de la duración del día sobre la tasa de progreso a la floración, vainas, y la madurez fisiológica ya que se llegan a optimizar hasta seis parámetros.

Para realizar todas estas calibraciones y validaciones, las fechas de siembra real y profundidades de siembra fueron manipuladas hasta conseguir la correcta fecha (fecha medida) de emergencia, floración o la primera vaina, respectivamente.

Si se compara el tiempo calendario necesario para la expansión de una hoja con el requerido para la progresión desde siembra hasta floración (30 y 154 días en función del tratamiento), este último es mucho más largo y por tanto, el efecto de las temperatura sobre su tasa de progreso esta promediado sobre un rango más amplio de condiciones meteorológicas, especialmente de temperaturas. Esta afirmación es incluso válida considerando una misma fecha de siembra. Se optimizaron hasta un máximo de seis parámetros (duración de la fase correspondiente (EM-FL, FL-SH, o SH-MF), T_b , T_{opt1} , T_{opt2} , CLDL, y

PPSEN) que afectan tanto la floración como posteriores fases reproductivas. Para la floración, los valores de los parámetros que aparecen por defecto pueden verse en la **Tabla 29** (modelo 1). Inicialmente se trató de optimizar cuatro parámetros (EM-FL, T_b , T_{opt1} , T_{opt2}) utilizando un modelo exclusivamente térmico, asumiendo que T_x toma su valor predeterminado (45 °C), utilizado en CROPGRO-fababean (modelo 2 en **Tabla 29**). Sin embargo, al obtenerse ajustes relativamente pobres a pesar del proceso de optimización de parámetros, se procedió a examinar la influencia del fotoperíodo sobre la floración. El modelo original (Boote *et. al.*, 2002) considera que la fase EM-FL de *Vicia faba* L. se acorta a medida que fotoperíodo se alarga. Inicialmente se mantuvieron todos los parámetros iniciales que aparecen por defecto en CROPGRO-fababean incluido el coeficiente de fotoperíodo (modelo 1 en Tabla 28), para luego optimizar progresivamente de uno a cinco parámetros, e incluso seis incluyendo entonces los parámetros relacionados con la sensibilidad al fotoperíodo, como se muestra en la **Tabla 29**.

Tanto para la optimización de la predicción de la fecha de primera vaina (SH) (**Tabla 30**) como de madurez fisiológica (MF) (**Tabla 31**) se siguió una pauta similar (**Tabla 30**) a la de floración, pero esta vez con once y cinco datos, para la calibración y validación, respectivamente. Al mostrar las optimizaciones que el fotoperíodo no afectaba a estas dos últimas fases del cultivo, el modelo térmico se consideró suficiente. Como se muestra en las tablas 30 y 31, se optimizó inicialmente únicamente para la duración de la fase (modelo 2), y progresivamente se fue aumentando el número de parámetros térmicos ((duración de la fase y T_b ; modelo 3), (duración de la fase, T_b y T_{opt1} ; modelo 4), (duración de la fase, T_b , T_{opt1} y T_{opt2} ; Modelo 5)).

2.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.3.1. Calibración de la tasa de aparición de nudos

2.3.1.1. Modelo térmico original (TH) y sus coeficientes

El modelo CROPGRO-fababean se ejecutó para evaluar su capacidad de predicción para esta nueva ubicación (Lugo) usando los parámetros originales propuestos por Boote *et al.* (2002) (véase el modelo 1 y valores de los parámetros en la **Tabla 28**). Con estos valores, al ejecutar el modelo, las predicciones del número de hojas que aparecen a lo largo del tiempo no fueron muy buenas, con sistemáticas subestimaciones ($y = 0.6505x + 0.5093$) resultando en una SSE de 3241 nudo² (índice-d = 0.8626) (**Tabla 28** y **Fig. 11**).

2.3.1.2. Modelo térmico modificado, evitando el retraso en la aparición de la primera hoja, con los coeficientes originales

En el modelo 1, se observó un retraso sistemático en la predicción del momento de ocurrencia de expansión de la primera hoja (estadio V1) que causó demasiado retraso en la expresión de aparición de nudos después de la emergencia. Buscando en el código Fortran, se observó que el modelo original (Boote *et al.*, 2002) requiere cuatro días térmicos después de la emergencia para expresar el primer nudo (V1), después del cual el modelo utiliza TRIFOL. Esto es claramente incorrecto cuando se compara con el calendario de aparición de hojas. Esta parte del código del modelo original se transcribió del

modelo de soja. Cuando esta fase umbral ($TH2 = 4$ DPT) se cambió por 0 DPT, y el desarrollo vegetativo se inició a cero, la SSE se redujo a 2683 nudo², y el retraso en la predicción de la emisión de los primeros nudos desapareció (véase el modelo 2 en **Tabla 28**).

2.3.1.3. Calibración de los modelos térmicos modificados

La versión anterior del modelo con la corrección del tiempo que transcurre hasta la aparición del primer nudo (modelo 2 en **Tabla 28**), no fue capaz de predecir la aceleración de la tasa de aparición de nudos que se observó en primavera al aumentar las temperaturas.

Cuando el modelo se optimizó sólo para TRIFOL (modelo 3 en Tabla 2), aceptando la sensibilidad a la temperatura (temperaturas cardinales), TRIFOL aumentó desde 0.350 a 0.46917 nudo/DPT (nudo por días fototérmicos), lo cual permitió dividir por más de tres SSE, alcanzando 847.66 nudo², y desapareció gran parte de la subestimación sistemática (ahora $y = 0.8765x + 1.2142$).

TRIFOL se define como la tasa de aparición de nudos por día cuando la temperatura es óptima, lo que implica una capacidad potencial de producir casi una nueva hoja cada 2 días. Sin embargo, este modelo sobreestimó un poco en condiciones de temperaturas frescas, sin ser capaz de predecir correctamente el aumento de la tasa de aparición de hojas asociado a la transición de temperaturas frescas a cálidas durante la primavera. Con todo esto, el modelo 3 tuvo tendencia a subestimar el número final de hojas.

Tabla 28. Precisión de diferentes submodelos de aparición de nudos con parámetros optimizados (sin paréntesis; valor medio del parámetro optimizado dentro de las 200 combinaciones que consiguen el mejor ajuste) o fijos entre corchetes []. Las cifras entre paréntesis () debajo del valor de un parámetro indican el error estándar del correspondiente parámetro optimizado dentro de las 200 combinaciones que consiguen el mejor ajuste.

	TRIFOL (nudo/DPT)	Tb (°C)	Topt1 (°C)	Topt2 (°C)	CLDL (h)	PPSEN (1/h)	SSE (nudo ²)	RMSE (nudo)	Indice-d	a	b	RMSEP (nudo)	Indice-d	a	b
	-----Calibración-----											-----Test Independiente-----			
1. Modeo original	[0.35]	[0]	[27]	[30]	-----	-----	3241	3.675	0.862560	0.5093	0.6505	3.2482	0.888815	-0.0917	0.7257
2. (TH2=0)	[0.35]	[0]	[27]	[30]	-----	-----	2683	3.344	0.882758	0.9048	0.6539	2.9122	0.908348	0.2961	0.7289
3. 1 parm TH	0.46917 (0.001495)	[0]	[27]	[30]	-----	-----	847.66	1.879	0.969200	1.2142	0.8765	1.519	0.97960	0.3986	0.9769
4. 2 parm TH-27	0.596423 (0.001936)	3.5849 (0.04124)	[27]	[30]	-----	-----	328.64	1.170	0.988569	0.6373	0.9390	1.076	0.98969	0.0617	0.9798
5. 2 parm TH-23	0.51520 (0.001497)	3.9334 (0.03759)	[23]	[30]	-----	-----	327.44	1.168	0.988627	0.6206	0.9404	1.074	0.989779	0.0387	0.9862
6. 3 parm TH	0.52430 (0.005377)	3.8767 (0.047264)	23.4775 (0.27204)	[30]	-----	-----	327.26	1.168	0.988634	0.6221	0.9404	1.074	0.989769	0.0421	0.9853
7. 4 parm TH	0.50949 (0.005557)	3.8754 (0.06608)	22.9042 (0.29908)	34.3642 (0.60080)	-----	-----	325.64	1.165	0.988687	0.6216	0.9402	1.073	0.989787	0.0475	0.9838
8. 5 parm ppsen	0.66048 (0.008367)	2.3967 (0.05964)	21.1973 (0.25791)	34.3232 (1.36784)	[24]	-0.03098 (0.00039)	270.87	1.062	0.990589	0.6274	0.9420	1.032	0.990802	-0.1191	1.0134
9. 4 parm ppsen	0.68157 (0.007872)	2.3087 (0.08809)	21.7228 (0.28853)	[30]	[24]	-0.03162 (0.00072)	271.02	1.063	0.990583	0.6303	0.9420	1.041	0.990664	-0.1272	1.0151
10. 3 parm ppsen	0.69566 (0.0034248)	2.2478 (0.07632)	[23]	[30]	[24]	-0.02991 (0.00047)	272.20	1.065	0.990528	0.6377	0.9405	1.021	0.990974	-0.1034	1.0095
11. 2 parm ppsen	0.79266 (0.00034)	[0]	[23]	[30]	[24]	-0.042587 (0.000021)	304.60	1.127	0.989357	0.7046	0.9352	1.017	0.991206	-0.1969	1.0297
12. 6 parm cldl-ppsen	0.63164 (0.000001)	2.4414 (0.00002)	20.7064 (0.00007)	34.9940 (0.00324)	22.9751 (0.00009)	-0.032437 (0.0000003)	270.27	1.061	0.990611	0.6261	0.9422	1.037	0.990726	-0.1246	1.0153
13. 5 parm cldl-ppsen	0.63085 (0.0085769)	2.3034 (0.06376)	21.7751 (0.20240)	[30]	21.5840 (0.40800)	-0.03427 (-0.00075)	270.98	1.063	0.990583	0.6286	0.9418	1.041	0.990661	-0.1276	1.0147
14. 4 parm cldl-ppsen	0.58561 (0.018214)	2.1297 (0.09293)	[23]	[30]	18.4770 (0.85112)	-0.03793 (0.00170)	271.91	1.064	0.990540	0.6348	0.9407	1.025	0.990907	-0.1180	1.0112
15. 3 parm cldl-ppsen	0.68137 (0.022832)	[0]	[23]	[30]	20.6872 (0.67436)	-0.04974 (0.00198)	304.77	1.127	0.989340	0.7004	0.9342	1.018	0.99117	-0.2005	1.0286

A continuación, se optimizaron tanto TRIFOL como T_b , con el supuesto de que la estimación de T_b no es del todo correcta ya que los investigadores lo calcularon mediante proyecciones lineales (método del x-intercepto; caso de Qi *et al.* (1999) que informaron que $T_b = -1$ a -2 °C), a pesar de no tener condiciones experimentales de temperaturas más frescas que 16.8 °C. Para correr el modelo asumimos que T_{opt2} es 30 °C. En principio, este parámetro no puede ser evaluado con rigor a partir de nuestros datos, ya que en Lugo las temperaturas se situaron por debajo de ese valor durante el periodo de expansión de hojas y se asumió que el valor de T_{opt1} había sido calculado correctamente en estudios llevados a cabo en cámaras de cultivo: 23 °C (Evans, 1957) o 27 °C (Qi *et al.*, 1999). Se consideraron dos optimizaciones que fijan T_{opt1} en 23 °C (modelo 5) y 27 °C (modelo 4). Esto permitió que sólo TRIFOL y T_b quedaran por resolver (**Tabla 28**). Con T_{opt1} y T_{opt2} fijadas en 27 °C y 30 °C, respectivamente (valores por defecto en CROPGRO-fababean), la optimización produjo un SSE de 328.64 nudo² con TRIFOL de 0.596423 nudo/DT y T_b de 3.5849 °C.

Con T_{opt1} fijada en 23 °C ($T_{opt2} = 30$ °C), la optimización redujo el SSE a 327.44 nudo², con una solución para TRIFOL = 0.51520 nudo/DT y T_b de 3.9334 °C. En ambos casos, tan sólo el aumento de T_b permitió reducir SSE en aprox. 61%, lo cual nos lleva a proponer que el haba tiene en realidad una mayor T_b para la tasa de expansión de hoja, de 3.6 a 3.9 °C que la descrita por Qi *et al.* (1999).

La inclusión de los parámetros TRIFOL y T_b en las optimizaciones permitió eliminar gran parte del defecto de sesgo sistemático. La mejora de los coeficientes de regresión lineal, entre los valores simulados y observados, a partir de los modelos 1 y 2 hasta 3, 4 y 5 puede verse en la **Tabla 28**. El RMSE, el índice-d y la regresión lineal fueron ligeramente mejores asumiendo 23 °C en vez de 27 °C como T_{opt1} para las habas (Tabla 28).

Aún pensando que no teníamos una base de datos obtenida con temperaturas suficientemente altas para estimar con cierta fiabilidad T_{opt2} , la siguiente cuestión que se planteó fue determinar si la predicción temporal de la

aparición de las hojas se podría mejorar de modo progresivo, mediante la optimización de todos los coeficientes de temperatura cardinales menos T_x , junto con TRIFOL (optimizaciones de 3 o 4 parámetros). Resolvimos primero para TRIFOL, T_b y T_{opt1} . En la optimización de estos tres parámetros (modelo 6), ninguno de ellos estuvo sujeto a limitaciones numéricas y se alcanzó una SSE mínimo de 327.26 nudo², similar al obtenido resolviendo sólo dos parámetros del modelo térmico con $T_{opt1} = 23.0$ °C (modelo 5). En concreto, el modelo 6 resolvió por un T_{opt1} de 23.4775 °C, valor muy próximo a los 23.0 °C fijado en el modelo 5, y en consecuencia el resto de los parámetros resueltos (TRIFOL y T_b) también fueron muy similares (**Tabla 28**). Finalmente, se optimizaron cuatro parámetros (modelo 7), consiguiéndose una SSE muy similar (325.64 nudo²). Los valores obtenidos, para T_b (3.8754 °C) y T_{opt1} (22.9042 °C) fueron de nuevo muy cercanos a 3.9 y 23 °C, respectivamente, lo cual confirma que la T_b de la tasa de aparición de hojas es claramente superior a 0 °C y que tal como lo propuso Evans (1959), 23 °C es un valor aceptable para T_{opt1} . Además, la desviación estándar sobre la estimación de parámetros dentro de las 200 mejores soluciones encontradas por el optimizador fue progresivamente más elevado, al pasar de T_b a T_{opt1} y T_{opt2} (0.06608; 0.29908 y 0.60080 °C, respectivamente). Por esta razón, tenemos mayor grado de confianza en el valor de T_b obtenido que en T_{opt1} , y confiamos más en T_{opt1} que T_{opt2} . En esta optimización, las 200 mejores combinaciones de todos los parámetros dieron estimaciones dentro de aproximadamente 1 unidad de SSE dando lugar a un rango de T_b comprendido entre 3.73 y 4.10 °C, de T_{opt1} entre 21.72 y 23.60 °C, y de T_{opt2} entre 32.35 y 35.00 °C. Esto hace viable fijar determinados parámetros apoyándose en datos publicados, sin perder precisión en las predicciones, como demuestran las optimizaciones en que T_{opt1} adopta los valores de 23 ó 27 °C (**Tabla 28**). Consideramos que el valor de 23 °C de T_{opt1} es más factible que 27 °C, ya que las optimizaciones con 3 y 4 parámetros se resolvieron con valores muy cercanos a 23 °C (modelos 6 y 7, Tabla 28). En cuanto a T_{opt2} , no hay suficientes periodos experimentales con condiciones de temperatura cálida en

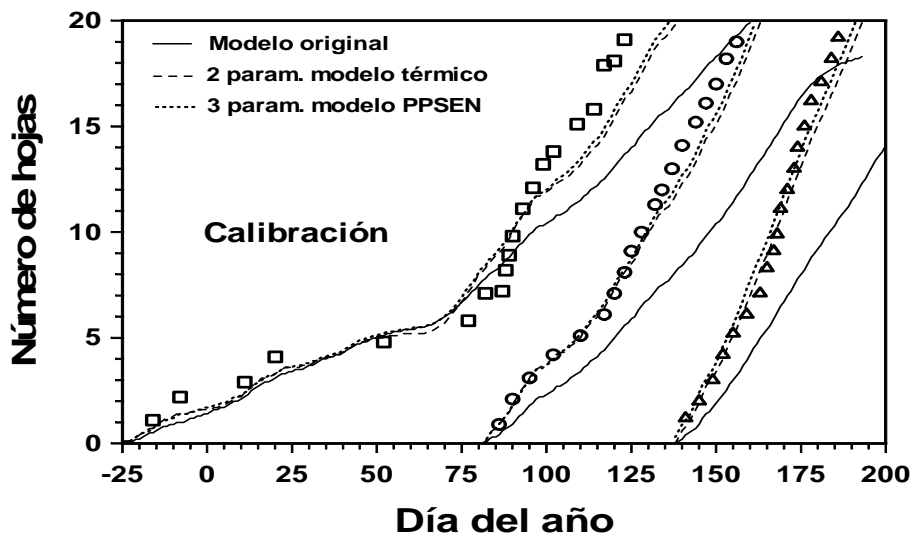
Lugo como para poder establecer su valor, aparte del hecho de que la optimización sugirió que la tasa de desarrollo de nudos no debe ser ralentizada hasta temperaturas superiores a 34 °C.

Con la finalidad de realizar una comprobación con datos reales, se computó la pendiente de la regresión lineal del número de nudos *versus* días durante los períodos más cálidos de crecimiento de seis de las doce fechas de siembra, teniendo en cuenta los nudos sólo cuando éstos parecen estar aumentando linealmente. La media de la pendiente simulada fue de 0.3835 nudos por día. Este valor es cercano al de los modelos 5, 6 y 7 (0.50949-0.52430 nudos por día), sobre todo teniendo en cuenta que durante parte de las fases o por lo menos durante algunas horas de estos días, la temperatura estuvo por debajo de la temperatura óptima.

2.3.1.4. Efecto del fotoperíodo sobre la tasa de expansión de hojas

Inicialmente, se consideró la posibilidad de que la expresión de nudos tuviera una transición a una tasa más rápida de aparición después de haberse expresado los 4 ó 6 primeros nudos (efecto juvenil). Pero el hecho de calibrar para una mayor T_b y una T_{opt1} de 23 ó 27 °C fue suficiente para que la aceleración observada después de los nudos 4 a 6 se viera en gran parte reflejada en el modelo. En realidad, esta transición coincidió con el periodo en el que las temperaturas pasaban de frías a templadas, observándose claramente en las fechas de siembra tempranas pero no en las fechas tardías (**Fig. 11a**). Más allá de la temperatura, hay dos posibles hipótesis para esta transición más rápida en la expresión de nudos. Una de ellas es que hay un efecto de maduración de la planta, yendo de un estadio juvenil a una condición de madurez. La transición hacia una expresión de nudos podría estar relacionada con la inducción a floración y la transición a un estado reproductivo. Se rechazó esta primera hipótesis al haber pocas evidencias de

(a)



(b)

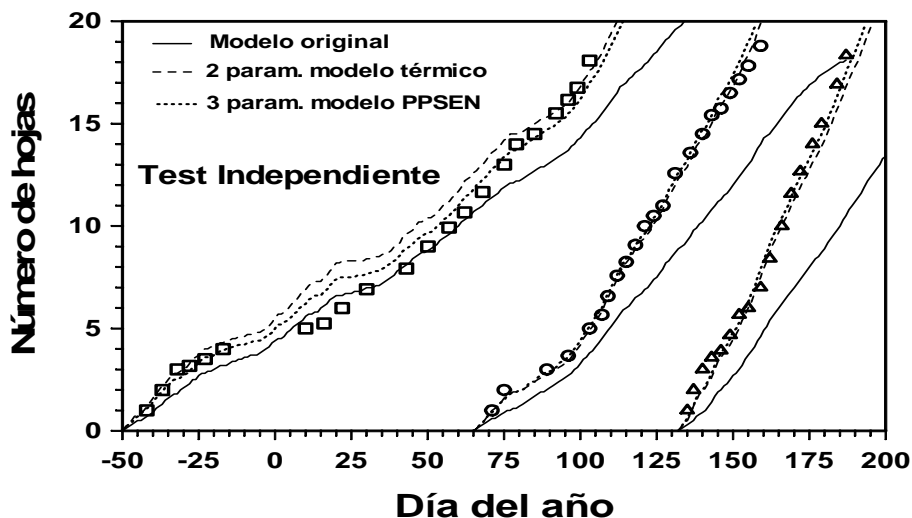


Fig. 11. Valores simulados (líneas) y observados (puntos) de la aparición temporal de hojas en el tallo principal para: (a) tres fechas de siembra del primer experimento (5 de noviembre de 2004, 17 de febrero de 2005 y 5 de mayo de 2005; calibración) y (b) tres fechas de siembra del tercer experimento (30 de octubre de 2006, 16 de febrero de 2007 y 30 de abril de 2007). Modelo original: $T_b = 0^\circ\text{C}$, $T_{opt1} = 27^\circ\text{C}$, $T_{opt2} = 30^\circ\text{C}$, $T_x = 40^\circ\text{C}$, $TRIFOL = 0.33$ nudo/DT; 2 param. modelo térmico: $T_b = 3.9^\circ\text{C}$, $T_{opt1} = 23^\circ\text{C}$ (fijo), $TRIFOL = 0.516$ nudo/DT; 3 param. modelo PPSEN: $T_b = 2.2^\circ\text{C}$, $T_{opt1} = 23^\circ\text{C}$ (fijo), $TRIFOL = 0.516$ nudo/DPT, $CLDL = 24$ h (fijo), $PPSEN = -0.0426$ (1/h).

este tipo de cambio en la tasa de aparición de hojas para los cultivos sembrados desde mediados de primavera hasta finales de verano.

La segunda hipótesis es que hay un efecto directo de la duración del día sobre la tasa de aparición de nudos, y que por tanto algo como que la luz del día *per se* estimula la tasa de crecimiento de la hoja, así como su aparición.

El hecho de que la tasa de aparición de nudos fue más rápida hacia finales de primavera y comienzos de verano (con días más largos y temperaturas más cálidas) posibilita la existencia de un efecto positivo de la duración del día sobre la tasa de aparición de nudos. Por lo tanto, para contrastar esta hipótesis, se añadió el efecto de sensibilidad al fotoperíodo al algoritmo del modelo fenológico y se trató de optimizar tanto los parámetros relacionados con el posible efecto de la duración del día (PPSEN y CLDL), como para las temperatura cardinales y TRIFOL. Inicialmente se resolvió para TRIFOL, T_b , T_{opt1} , T_{opt2} , con la adición del parámetro de sensibilidad al fotoperíodo, PPSSEN, mientras el valor de CLDL se fijó en 24.0 h, para reducir, a continuación y de modo progresivo, el número de parámetros optimizados de cinco a dos (modelos PPSSEN: los modelos 8 a 11, en **Tabla 28**).

PPSEN es la pendiente lineal de sensibilidad al fotoperíodo cuando la duración del día es más corta que la longitud crítica del día (CLDL) por encima de la cual, el desarrollo de la planta se presenta a la tasa máxima que puede alcanzar para una temperatura dada. PPSSEN = 0 (1/h) indica que no existe sensibilidad. Así, en una especie de día largo, como las habas, PPSSEN adopta valores negativos, siendo el cultivar tanto más sensible al fotoperíodo cuanto más negativo es PPSSEN. La optimización de estos cinco parámetros (modelo 8) empleó datos de 240 observaciones recogidas en 12 fechas de siembra durante 2 años de experimento, y obtuvo buenos resultados consiguiendo una SSE mínimo de 270.87 nudo² (**Tabla 28**). Esta optimización llevó a los siguientes parámetros: TRIFOL = 0,66048 nudos por DPT (días fototermales, de 24 horas a temperatura óptima), T_b = 2.3967 °C, T_{opt1} = 21.1973 °C, T_{opt2} = 34.3232 °C, y PPSSEN = -0,03098 1/h. Este valor de PPSSEN que afecta la tasa de aparición de nudos es muy próximo al valor original de CROPGRO-

fababea para la floración ($PPSEN = -0.031 \text{ 1/h}$). Al añadir el efecto de la duración del día al modelo, el SSE se redujo de 325.64 a 270.87 nudo² y el valor del índice- d aumentó, lo que muestra una mejora de la predicción de la aparición de nudos (**Tabla 28**). Esta versión de cinco parámetros conduce a un mayor valor de TRIFOL (que se define ahora con una duración del día de 24 horas y una temperatura por encima de 21.1973 °C). Su temperatura base fue de al menos 1.0 °C inferior a la obtenida con los modelos térmicos (modelos 4 a 7), pero sigue siendo claramente superior a los 0 °C que se propone en la literatura y la utilizada en el modelo original. Para probar el mérito de mantener los valores por defecto de T_{opt1} y T_{opt2} a 23.0 y 30.0 °C, respectivamente, con la versión sensible a la duración del día, se corrieron dos optimizaciones adicionales, una con 4 parámetros (TRIFOL, T_b , T_{opt1} , $PPSEN$) con T_{opt2} fijado en 30.0 °C (modelo 9) y la segunda con 3 parámetros (TRIFOL, T_b , $PPSEN$) con T_{opt1} y T_{opt2} fijado en 23.0 y 30.0 °C, respectivamente (modelo 10). Como el mejor ajuste de los modelos 9 y 10 fue muy similar al mejor del modelo 8, con SSEs respectivos de 271.02, 272.20 y 270.87 nudo² (**Tabla 28**), se llegó a la conclusión de que T_{opt1} y T_{opt2} pueden ser fijados en 23.0 (original de Evans, 1959) y 30.0 °C, respectivamente, con poca pérdida en la exactitud en la aparición de nudos. Por último, hemos intentado fijar T_b al valor de 0 °C que se propone en la literatura (modelo 11). La reducción de T_b desde 2.2 a 0 °C, provocó que la SSE aumentara a 304.60 nudo², lo que confirma que el modelo necesita una mayor T_b , tanto para versiones sólo térmicas como sensibles a la longitud del día.

Se intentó resolver otro conjunto de optimizaciones (CLD- $PPSEN$; modelos 12 a 15, en la **Tabla 28**) que incluían los dos parámetros de duración del día del modelo (CLDL y $PPSEN$; Boote *et al.*, 2002).

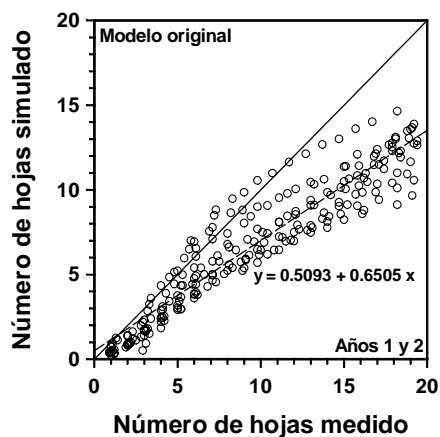
En primer lugar, se corrió una optimización con seis parámetros (TRIFOL, T_b , T_{opt1} , T_{opt2} , CLDL, $PPSEN$) (modelo 12 en la Tabla 28). Esta optimización produjo una SSE de 270.27 nudo², muy próxima a la lograda con los modelos de $PPSEN$ (Tabla 28). Esta optimización fue resuelta con un CLDL muy cercano a 23 h, y con un $PPSEN$ algo menor al obtenido en los modelos

PPSEN (-0.032437 en lugar de -0,03098 1/h). Se observó, una vez más, que el valor de PPSSEN que afecta la aparición de hojas es muy cercano al valor utilizado por el modelo original para predecir la fecha de floración (PPSEN = -0.031 1/h) y que T_b está cercano a 2.4 °C, al igual que para los modelos de PPSSEN (**Tabla 28**). Para probar la posibilidad de mantener los valores del modelo original de T_b , T_{opt1} y T_{opt2} en 0.0, 23.0 y 30.0 °C, respectivamente, en versiones del modelo sensibles al fotoperiodo que permiten optimizar tanto CLDL como PPSSEN, se corrieron optimizaciones adicionales (modelos 13, 14 y 15). Estas optimizaciones pusieron de manifiesto que se perdía poca precisión al fijar T_{opt1} en 23 °C o T_{opt2} en 30 °C. Sin embargo, al fijar T_b en 0 °C se produjo un aumento de SSE y una disminución en el ajuste del modelo con los datos experimentales, lo que confirmó la necesidad de una mayor T_b (**Tabla 28**).

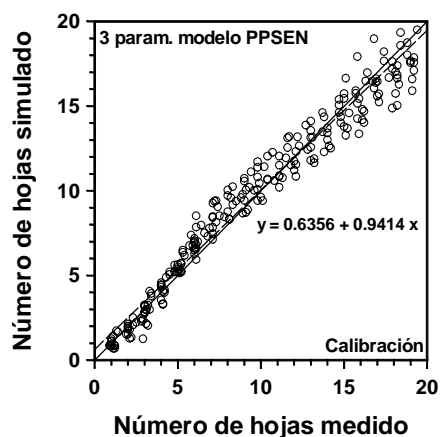
2.3.2. Evaluación de la tasa de aparición de nudos con datos independientes

La evaluación de los diferentes modelos térmicos con datos independientes que no se utilizaron durante el proceso de calibración de los parámetros (**Tabla 28 y Fig. 12b**) (tercer año de experimentación: 105 mediciones) confirma que el aumento T_b de 0 °C, (que aparece por defecto) a valores de 3,6 a 3,9 °C en los modelos térmicos permitió mejorar de modo sistemático las predicciones. Esto demuestra claramente la necesidad de aumentar de T_b para este proceso. Por otro lado, como en el proceso de calibración, se observó, de modo sistemático, una ligera mejora de las estimaciones al añadir la sensibilidad al fotoperíodo. Esto confirma que el fotoperíodo tiene algún efecto en la tasa de aparición de hojas (**Figs.12 b y c**).

(a)



(b)



(c)

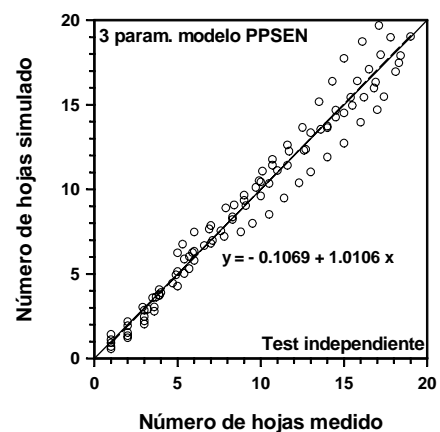


Fig. 12. Valores simulados *versus* valores medidos del número total de hojas sobre el tallo principal: (a): años 1 y 2 con el modelo original ($T_b = 0^\circ\text{C}$; $T_{opt1} = 27^\circ\text{C}$; $T_{opt2} = 30^\circ\text{C}$; $T_x = 40^\circ\text{C}$; $TRIFOL = 0.33$ nudo/DT); (b): con 3 param. modelo PPSEN ($T_b = 2.2^\circ\text{C}$; $T_{opt1} = 23^\circ\text{C}$ (fijo); $TRIFOL = 0.516$ nudo/DPT; $CLDL = 24$ h (fijo); $PPSEN = -0.0426$ 1/h); (c): test independiente del 3 param. modelo PPSEN con año 3.

2.3.3. Calibración del progreso hasta floración

2.3.3.1. Modelo fototérmico original y sus coeficientes

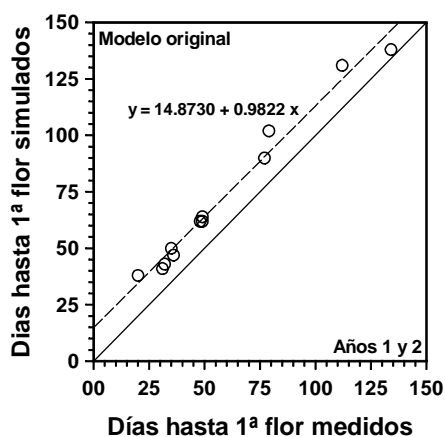
El hecho de que la fecha de siembra de junio requiera un número de días muy bajo (30 DAS) para alcanzar el inicio de floración muestra que el cultivar Alameda no pertenece a un ecotipo de habas que requiera vernalización. Para establecer el modelo original, Boote *et al.* (2002) determinaron dos parámetros, EM-FL (duración de la fase) y PPSEN (sensibilidad al fotoperíodo) que afectaban el tiempo necesario para alcanzar la floración utilizando una base de datos relativamente escasa, limitada a 5 fechas de siembra realizadas en España: dos en Córdoba de finales de otoño y principios de invierno (estaciones de crecimiento 1986-87 y 1987-88) y tres distribuidas en un amplio rango de fechas en Lugo (estación de crecimiento 1999-00). Estas cinco fechas de siembra realizadas en dos localidades permitieron abarcar diferentes regímenes de temperatura y de fotoperíodo entre emergencia y floración y minimizar el error de las estimaciones del modelo de las fechas de floración con valores respectivos de EM-FL y de PPSEN de 23 DPT y -0.031 1/h. En esta optimización se asumió T_b de 0.0 °C (Plancquaert y Girard, 1987; Stützel, 1995a; Manschadi *et al.*, 1998b), T_{opt1} y T_{opt2} de 22.0 y 26 °C, respectivamente (de Evans, 1959), y CLDL de 24.0 h (Stützel, 1995a; Manschadi *et al.*, 1998b). El objetivo de este apartado es poner a prueba estas hipótesis de partida de temperatura base y temperaturas óptimas y uno de los parámetros de sensibilidad a la duración del día (CLDL), mediante un nuevo proceso de calibración utilizando la base de datos obtenida en Lugo entre 2004 y 2007. También se pretende comprobar, con esta misma base de datos, los dos parámetros calibrados por Boote *et al.* (2002): duración de la fase (EM-FL) y el otro parámetro de sensibilidad a la duración del día (PPSEN) para avanzar hacia la floración, con el fin de mejorar la predicción de esta fase, así como posteriores eventos fenológicos, en virtud de un amplio rango de fechas de siembra en Lugo.

Los datos disponibles constaban de 12 fechas de siembra con 12 fechas correspondientes a la aparición de la primera flor. Antes de correr las simulaciones iterativas necesarias al proceso de optimización de parámetros, el modelo se ajustó para predecir con exactitud la fecha de emergencia observada para cada fecha de siembra (modificando en el archivo de experimento (FBX) la fecha de siembra atrás o adelante, más o menos un día). En todas las optimizaciones, Tx se fijó en el valor por defecto (45 °C). Por otra parte, no se esperaba que la teórica tasa más lenta de progresión a temperaturas por encima de T_{opt2} tuviera una consecuencia significativa en nuestra simulaciones, ya que en los periodos experimentales, las temperaturas alcanzaron valores por encima de 26.0 °C sólo en la primera y la última fecha de siembra del segundo experimento, y esto ocurrió sólo durante unos días. Con estos coeficientes por defecto, se corrió el modelo (modelo 1 en **Tabla 29**) y se calcularon los estadísticos que permiten cuantificar la exactitud de las predicciones de la fecha de floración. Las predicciones fueron poco precisas, con SSE 2556 d². En la **Fig. 13** se puede ver el ajuste entre los datos medidos y las simulaciones de este modelo con los parámetros originales.

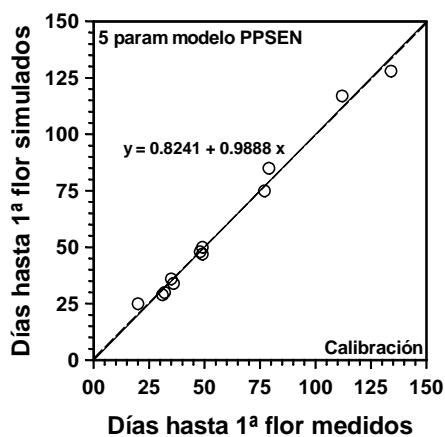
2.3.3.2. Modelo térmico

Primero se intentó un modelo térmico (TH) de cuatro parámetros (modelo 2 en la **Tabla 29**) con la idea de poder compararlo más adelante con modelos que incluyen la sensibilidad al fotoperíodo y así poder confirmar o rechazar la hipótesis de que el efecto de la duración del día era necesario para predecir correctamente la floración. Con este modelo térmico, el optimizador obtuvo una duración de la fase de 23.0831 DPT y T_{opt1} de 21.5129 °C, ambos valores son muy cercanos a los parámetros del modelo original (23.0 DPT y 22.0 °C, respectivamente), pero se obtuvieron resultados mayores de T_b y T_{opt2} que los originales (3.1606 y 34.1055 °C, cuando por defecto eran 0 y 26.0 °C, respectivamente). Una vez calibrado, el modelo térmico dio una mejor precisión en la fecha de predicción de la floración (SSE= 465 d²) que el modelo por defecto (2556 d²), pero RMSE fue aún grande (6.225 versus 14.595 d).

(a)



(b)



(c)

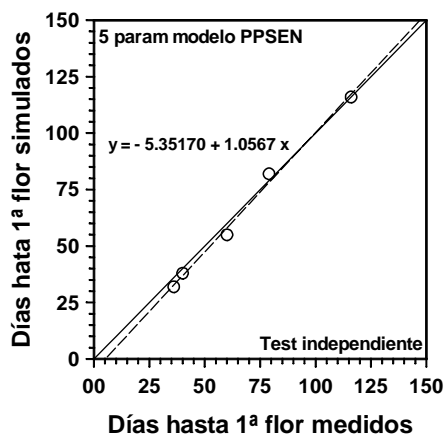


Fig. 13. Valores simulados *versus* valores medidos del número de días entre emergencia y floración: (a): años 1 y 2 con el modelo original ($T_b = 0^\circ\text{C}$; $T_{opt1} = 22^\circ\text{C}$; $T_{opt2} = 26^\circ\text{C}$; $T_x = 45^\circ\text{C}$; EM-FL = 23 DPT; CLDL = 24 h; PPSEN = -0.031 1/h); (b): con 5 param. modelo PPSEN ($T_b = -3.8^\circ\text{C}$; $T_{opt1} = 22.9^\circ\text{C}$; $T_{opt2} = 33.8$; EM-FL = 11.54 DPT; CLDL = 24 h (fijo); PPSEN = -0.0528 1/h); (c): test independiente con año 3 del 5 param. modelo PPSEN.

Al igual que en los modelos de tasa de aparición de hojas, la T_b requirió ser modificada a valores superiores a $0.0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

A la vista de las crecientes desviaciones estándares obtenidas desde T_b , T_{opt1} hasta llegar a T_{opt2} para las 200 combinaciones de parámetros que permiten alcanzar las mejores estimaciones de la fecha de floración, tenemos un mayor grado de confianza en el valor estimado de T_b que en el de T_{opt1} , y en el de T_{opt1} que en el de T_{opt2} (**Tabla 29**).

2.3.3.3. Modelos con sensibilidad al fotoperiodo original

En los modelos con sensibilidad al fotoperiodo original (DL; modelos 3 a 6 en **Tabla 29**), PPSEN y CLDL se fijaron en sus valores por defecto y se optimizaron hasta cuatro parámetros (EM-FL, T_b , T_{opt1} y T_{opt2}) en el modelo 6, con el fin de saber si el efecto de la longitud del día permite mejorar la predicción de la fecha de floración, tal como se describe en la literatura. Todas estas optimizaciones (modelos DL) consiguieron mejores ajustes que el del modelo anterior (modelo 2), reduciéndose SSE hasta 304 d^2 en el modelo 6. Esto demostró que la inclusión de la variable longitud del día (aún sin optimizar los parámetros vinculados a ella) tuvo un efecto positivo en las predicciones. Como EM-FL se define ahora con 24 h de duración del día, el valor de EM-FL resultante de la optimización es menor que el obtenido con el modelo térmico (**Tabla 29**), pero ahora T_b es menor, más cercana a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($1.2751\text{ }^{\circ}\text{C}$) y T_{opt1} ($22.6300\text{ }^{\circ}\text{C}$) es cercano a su valor original ($22.0\text{ }^{\circ}\text{C}$).

2.3.3.4. Modelos fotoperiódicos PPSEN

Para determinar si una modificación en PPSEN puede proporcionar una mejor predicción en la fecha de floración, se creó un modelo de cinco parámetros, donde se optimizó la duración de la fase de emergencia a floración (EM-FL), T_b , T_{opt1} , T_{opt2} , y PPSEN y se mantuvo CLDL fijo en su valor por defecto (24.0 h) (modelo 7 en **Tabla 29**). Con este modelo se consiguió una SSE mínima de 144 d^2 , lo cual es más de un 50% menor que la conseguida manteniendo PPSEN fijo en su valor original (modelo 6). Esta experiencia con valores de PPSEN fijo u optimizados puso de relieve la necesidad de incluir en el modelo la sensibilidad al fotoperíodo y mostró que la floración es claramente acelerada por la presencia de días largos, tal como está descrito en la literatura (Evans, 1959). El aumento en sensibilidad a la duración del día de este modelo (PPSEN es ahora -0.052747 1/h en comparación con el valor por defecto -0,031 1/h) es evidente, pero está vinculado a una importante disminución de la T_b (ahora -3.7697 °C) (Tabla 29), mientras se observan valores de T_{opt1} (22.8726 °C) que continúan siendo cercanos a 22.0 °C.

En las siguientes optimizaciones de los modelos con PPSEN (modelos 8, 9 y 10), se intentó minimizar el número de parámetros de temperaturas cardinales sujetos a variación respecto de los originales. Primero se fijó T_{opt2} en 26 °C, luego T_{opt1} y T_{opt2} en 22 y 26 °C, y finalmente, T_b , T_{opt1} y T_{opt2} , en 0, 22 y 26 °C, respectivamente.

El uso de los valores originales de T_{opt1} y T_{opt2} no tuvo ningún efecto sobre la precisión, y por lo tanto se consideran adecuados cuando se asocian con los nuevos valores de EM-FL, T_b y PPSEN. Sin embargo, cuando en el modelo 7 la T_b se fijó en 0 °C, su valor original (**Tabla 29**), la SSE se incrementó, lo que indica claramente que un aumento de la T_b es necesaria para el modelo térmico (modelo 2) o cuando PPSEN se mantiene en su valor

original (modelo 6). Sin embargo, los valores de T_b pasan a ser claramente negativos en cuanto se optimiza PPSEN.

2.3.3.5. Modelos fotoperiódicos CLDL

Para finalizar, se probaron versiones sensibles al fotoperiodo más complejas, donde se optimizaron conjuntamente los parámetros CLDL y PPSEN (modelos 11, 12, 13 y 14). La primera optimización se realizó con seis parámetros ($E-F$, T_b , T_{opt1} , T_{opt2} , CLDL, PPSEN; modelo 11), para luego reducir sucesivamente de a uno, el número de parámetros de temperaturas cardinales optimizadas (modelos de 12, 13 y 14). Con seis parámetros, CLDL y PPSEN se quedaron cerca de 18.1 h y -0.0077 1/h, respectivamente. Sin embargo, la ganancia en exactitud debido a este parámetro adicional fue pequeño (**Tabla 29**), lo que indica que se pueden obtener buenas predicciones manteniendo CLDL en su valor original (24 h) mientras que se optimizan los valores de parámetros más importantes, como PPSEN y T_b . En el conjunto de optimización CLDL (modelos 11, 12, 13 y 14), se puede apreciar una vez más la importancia de optimizar T_b , con el aumento de SSE de 149 a 208 cuando T_b se fija en 0 °C en el modelo 14.

Tabla 29. Precisión de diferentes submodelos de fecha de floración con parámetros optimizados (sin paréntesis) o fijos entre corchetes []. Las cifras entre paréntesis () debajo del valor de un parámetro indican el error estándar del correspondiente parámetro optimizado dentro de las 200 combinaciones de parámetros que consiguen el mejor ajuste.

	EM-FL (PTD)	Tb (°C)	Topt1 (°C)	Topt2 (°C)	CLDL (h)	PPSEN (1/h)	SSE (d ²)	RMSE (día)	Índice-d	a	b	RMSP (día)	Índice-d	a	b
	-----Calibración-----											-----Test Independiente-----			
1. Modelo original	[23]	[0]	[22]	[26]	[24]	[-0.031]	2556	14.595	0.954791	14.873 0	0.9822	22.601	0.747259	23.006 0	0.4410
2. TH 4 param	23.0831 (0.1009)	3.1606 (0.0273)	21.5129 (0.1129)	34.1055 (0.6005)	-----	-----	465	6.225	0.991258	2.7793	0.9682	9.777	0.965517	14.407	0.7952
3. 1 param DL original	17.7281 (0.0012)	[0]	[22]	[26]	[24]	[-0.031]	374	5.583	0.992551	6.3004	0.9151	7.014	0.982918	9.4746	0.8267
4. 2 param DL original	15.8802 (0.0050)	1.5043 (0.0085)	[22]	[26]	[24]	[-0.031]	327	5.220	0.993880	1.0440	0.9751	6.372	0.986808	4.891	0.8868
5. 3 param DL original	14.4402 (0.0728)	1.2106 (0.0223)	24.7390 (0.1242)	[26]	[24]	[-0.031]	315	5.123	0.994073	2.1633	0.9701	6.356	0.986783	5.4961	0.8807
6. 4 param DL original	15.7373 (0.0018)	1.2751 (0.0010)	22.6300 (0.0019)	33.7706 (0.8152)	[24]	[-0.031]	304	5.033	0.994296	1.9145	0.9730	6.356	0.986783	5.4961	0.8807
7. 5 param ppsen	11.5391 (0.0410)	-3.7697 (0.1177)	22.8726 (0.0090)	30.9168	[24]	-0.052747 (0.000083)	144	3.464	0.997333	0.8241	0.9888	3.286	0.997024	-5.3517	1.0567
8. 4 param ppsen	11.6981 (0.0179)	-4.4409 (0.287)	21.4097 (0.0675)	[26]	[24]	-0.053875 (0.000039)	149	3.524	0.997203	1.0292	0.9753	3.847	0.995971	-6.9218	1.0683
9. 3 param ppsen	11.1001 (0.0098)	-4.3766 (0.0672)	[22]	[26]	[24]	-0.054568 (0.000076)	149	3.524	0.997253	-0.1859	0.9932	4.450	0.994716	-8.4548	1.0884
10. 2 param ppsen	12.0609 (0.0440)	[0]	[22]	[26]	[24]	-0.046958 (0.000055)	216	4.2426	0.996133	-0.7838	1.0191	4.147	0.995108	-3.4382	1.0217
11. 6 param cldl-ppsen	14.0173 (0.0518)	-3.8778 (0.0510)	27.8248 (0.1004)	34.3879 (0.3434)	18.0993 (0.017)	-0.077363 (0.000269)	136	3.367	0.997511	-0.3806	1.0008	3.688	0.996259	-8.3679	1.0758
12. 5 param cldl-ppsen	13.4202 (0.0654)	-4.2950 (0.0521)	25.7344 (0.1620)	[26]	19.1578 (0.020)	-0.073038 (0.000189)	143	3.452	0.997347	-0.1712	0.9873	4.583	0.994369	-8.4899	1.0829
13. 4 param cldl-ppsen	14.3715 (0.1178)	-4.4280 (0.0412)	[22]	[26]	19.8355 (0.103)	-0.070699 (0.000580)	149	3.524	0.997253	-0.1859	0.9932	4.450	0.994716	-8.4548	1.0884
14. 3 param cldl-ppsen	17.3622 (0.0239)	[0]	[22]	[26]	17.0004 (0.014)	-0.067474 (0.000090)	208	4.163	0.996230	-0.0371	1.0092	3.975	0.995415	-1.9052	1.0016

Tabla 30. Precisión de diferentes submodelos de ocurrencia de la fase de primera vaina con parámetros optimizados (sin paréntesis) o fijos [corchetes]. Las cifras entre paréntesis () debajo de un parámetro indican el error estándar de la optimización del mismo dentro de las 200 combinaciones de parámetros que consiguen el mejor ajuste.

	FL-SH (PTD)	Tb (°C)	Top1 (°C)	Top2 (°C)	CLDL (h)	PPSEN (1/h)	SSE (d ²)	RMSE (d)	Índice-d.	a	b	RMSP (d)	Índice-d.	a	b
-----Calibración-----												-----Test Independiente-----			

1. Modelo original	[11]	[0]	[22]	[26]	-----	-----	371	5.808	0.766818	11.255	0.4676	3.795	0.934641	7.9142	0.6003
2. 1param TH	9.1969 (0.0310)	[0]	[22]	[26]	-----	-----	221	4.482	0.815550	8.8426	0.4306	5.495	0.863378	6.1269	0.5420
3. 2 param TH	5.5083 (0.0057)	8.2251 (0.0175)	[22]	[26]	-----	-----	91	2.876	0.955469	1.9182	0.9047	3.066	0.973180	2.1828	0.9799
4. 3 param TH	5.7591 (0.667)	8.6551 (0.0890)	20.6686 (0.2810)	[26]	-----	-----	91	2.876	0.955469	1.9182	0.9047	3.066	0.973180	-2.1828	0.9799
5. 4 param TH	5.7514 (0.1190)	7.5943 (0.661)	22.64.11 (0.3778)	31.6350 (1.9564)	-----	-----	91	2.923	0.952156	2.5316	0.8659	2.793	0.977032	-1.2201	0.9529
6. 5 param ppsen	2.9226 (0.0094)	2.1158 (0.1640)	14.8181 (0.1475)	28.7556 (1.1820)	[24]	-0.071338 (0.000116)	53	2.195	0.970185	2.8108	0.8114	3.578	0.967895	-5.7127	1.1208
7. 4 param ppsen	2.3137 (0.0367)	2.5541 (0.8765)	14.4058 (0.4800)	[26]	[24]	-0.076393 (0.000530)	56	2.256	0.972528	0.9337	1.0735	4.336	0.960471	-9.6978	1.3316
8. 3 param ppsen	2.0706 (0.0090)	-2.0514 (0.1753)	[22]	[26]	[24]	-0.075112 (0.000087)	58	2.296	0.970654	1.4822	0.9033	3.768	0.967148	-7.4627	1.2146
9. 2 param ppsen	2.1402 (0.0192)	[0]	[22]	[26]	[24]	-0.072819 (0.000250)	62	2.374	0.968304	1.4560	0.8918	3.742	0.966530	-6.8284	1.1744
10. 6 param cldl-ppsen	2.3053 (0.0217)	2.6410 (0.2306)	16.7868 (0.1491)	18.4872 (0.3864)	22.9630 (0.0183)	-0.080522 (0.000114)	47	2.067	0.975428	1.3017	0.8330	4.427	0.956302	-8.6157	1.2411
11. 5 param cldl-ppsen	3.1299 (0.0089)	4.0771 (0.0802)	15.1325 (0.0766)	[26]	20.4450 (0.0118)	-0.102272 (0.000125)	53	2.195	0.974637	0.8184	0.9594	4.336	0.960471	-9.6978	1.3316
12. 4 param cldl-ppsen	2.3613 (0.0754)	-2.1492 (0.3285)	[22]	[26]	22.4139 (0.2498)	-0.085222 (0.001464)	59	2.316	0.969513	1.6607	0.8833	3.768	0.967149	-7.4627	1.2146
13. 3 param cldl-ppsen	2.3495 (0.0490)	[0]	[22]	[26]	22.8475 (0.2444)	-0.079340 (0.001656)	62	2.374	0.968304	1.4560	0.8918	3.742	0.966530	-6.8284	1.1744

2.3.4. Evaluación del progreso hasta la floración con datos independientes

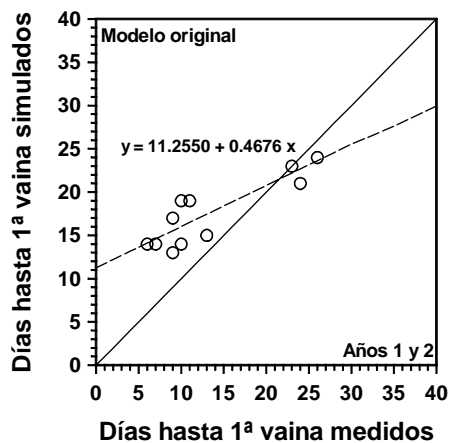
La evaluación de los diferentes modelos con datos independientes (tercer año de experimentación: 5 mediciones) confirma que las predicciones, con cualquiera de los modelos propuestos que incluyan el efecto de duración del día (modelos de 3 a 14), fueron sistemáticamente mejores que con el modelo térmico de 4 parámetros (modelo 2) (**Tabla 29**). Esto demuestra claramente la necesidad de incluir la sensibilidad a la longitud del día para simular la floración del haba. Además, el modelo 6 (modelo de 4 parámetros con PPSEN establecido en su valor por defecto) fue el más pobre en cuanto a la sensibilidad a la duración del día de todo el grupo. Esto confirmó que los valores de PPSEN necesitan tener valores cercanos a -0.05 1/h o incluso más negativos si CLDL toma valores inferiores a 24.0 h. Por último, los modelos CLDL (modelos de 11 a 14) resultaron no ser más precisos para la validación que los modelos PPSEN (modelos de 7 a 10), por lo que parece aconsejable mantener CLDL en su valor inicial (24.0 h).

2.3.5. Calibración de la predicción de primera vaina

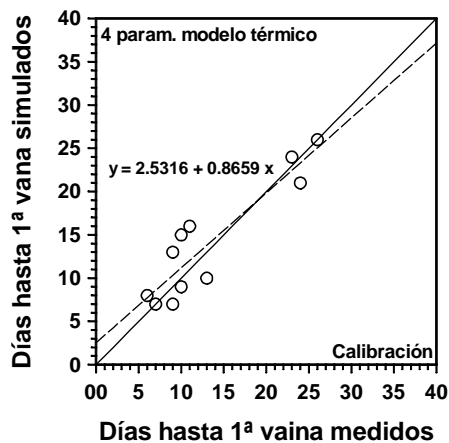
2.3.5.1. Modelo térmico original y coeficientes

La **Tabla 30** muestra la SSE que se obtiene con el modelo original (modelo 1) utilizando las temperaturas cardinales por defecto y la duración de la fase (FL-SH = 11 DPT) calibrada por Boote *et al.* (2002) para lograr una correcta acumulación temporal de biomasa en las vainas, en los ensayos realizados en Córdoba. Con estos parámetros, el SSE fue 371 d², y el análisis de regresión lineal entre días medidos y observados desde floración hasta primera vaina mostró una baja pendiente (0.4676) y un alto intercepto (11.255) (**Fig. 14a**).

(a)



(b)



(c)

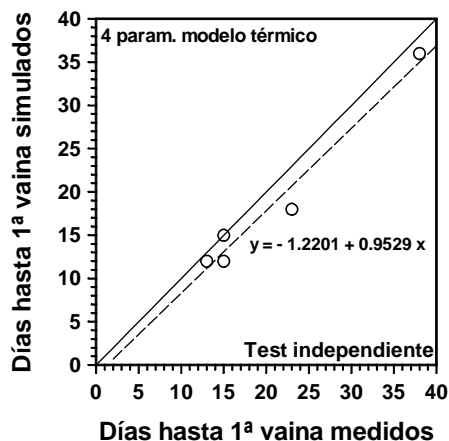


Fig. 14. Valores simulados *versus* valores medidos del número de días entre floración y primera vaina (a): años 1 y 2 con el modelo original ($T_b = 0^\circ\text{C}$; $T_{opt1} = 22^\circ\text{C}$; $T_{opt2} = 26^\circ\text{C}$; $T_x = 45^\circ\text{C}$; FL-SH = 11 DPT) y (b): con 4 param. modelo térmico ($T_b = 7.6^\circ\text{C}$; $T_{opt1} = 22.6^\circ\text{C}$; $T_{opt2} = 31.6^\circ\text{C}$; $T_x = 45^\circ\text{C}$ (fijo); FL-SH = 5.75 DPT); (c): test independiente con año 3 del 4 param. modelo térmico.

2.3.5.2. Modelos térmicos calibrados

En esta serie de modelos, se optimizaron progresivamente un parámetro (FL-SH; modelo 2), dos (FL-SH y T_b ; modelo 3), tres (FL-SH, T_b y T_{opt1} ; modelo 4) y, finalmente cuatro parámetros (FL-SH, T_b , T_{opt1} y T_{opt2} ; modelo 5) dejando los parámetros no optimizados en su valor por defecto (**Tabla 30**). Calibrando la duración de la fase (modelo 2), se redujo el SSE de 371 (modelo 1) a 221 d^2 , pero calibrando también para la T_b , (modelo 3), se mejoró el ajuste mucho más, con una reducción de SSE de 221 a 91 d^2 .

El valor optimizado de T_b fue cercano a 8.2 °C, que puede parecer alto si se compara con los comprendidos entre 2.2 y 3.9 °C para T_b optimizado en los modelos de aparición de hoja (Tabla 28) y 1.2 y 4.0 °C para los de fecha de floración (tabla 29). Estos altos valores de T_b conseguidos en los modelos térmicos impiden la formación de las vainas cuando la temperatura no supera 8.2 °C al menos durante parte del día. Esto ocurrió en la primera fecha de siembra del segundo año, donde el cultivo floreció el 29 de octubre de 2005, pero no llegó a producir vainas, muriendo por congelación el 21 de diciembre de 2005 (53 días después de la floración, sin vaina). Se supone que la baja temperatura pudo haber impedido la polinización exitosa de las flores que se fueron abriendo entre el 29 de octubre y el 20 de diciembre de 2005.

A continuación, la optimización de parámetros adicionales como T_{opt1} (modelo 4) o T_{opt1} y T_{opt2} (modelo 5), no mejoró el ajuste de las estimaciones (SSE idénticos; (**Tabla 30**)), lo que demuestra que los valores por defecto de T_{opt1} y T_{opt2} de 22 y 26 °C, respectivamente, son adecuados. (**Fig. 14b**).

2.3.5.3. Modelos de duración del día

Con el fin de determinar si FL-SH es una fase sensible a la duración del día, se intentaron dos conjuntos de optimizaciones: PPSEN optimizado con CLDL fijado en 24.0 h (modelos 6, 7, 8 y 9) y la optimización de ambos, CLDL PPSEN (modelos 10, 11, 12 y 13). Todas estas optimizaciones siempre proveyeron una clara reducción de SSE (50% menos cuando se optimizan seis parámetros (modelo 10) en comparación con los modelos 3, 4 y 5) y PPSEN

optimizado con valores comprendidos entre -0.071 y 0.102 1/h). Por lo tanto, hasta este momento del proceso de calibración, la duración del día se mostraba como necesaria para simular el tiempo hasta la primera vaina. Como ya se vio para la tasa de aparición de hojas y el progreso hacia floración, la inclusión del efecto de la duración del día sobre el tiempo hasta la primera vaina condujo a un menor valor optimizado de T_b .

2.3.6. Evaluación de la predicción de la primera vaina con datos independientes

La evaluación de los diferentes modelos con datos independientes (tercer año de experimentación: 5 mediciones) (**Fig. 14c**) indicó que las predicciones fueron sistemáticamente mejores con cualquiera de los modelos térmicos propuestos con más de un parámetro (modelos de 3 a 5; RMSEP de 3.066 d o menos) en comparación con modelos sensibles a la duración del día (modelos de 6 a 13; mejor RMSEP = 3.578 d). Esto sugiere que el mejor ajuste obtenido con modelos que incluyen la sensibilidad a la duración del día en el proceso de calibración puede ser sólo un artefacto (calibrando con seis parámetros existen más posibilidades para que las simulaciones cuadren con los datos medidos que calibrando únicamente con cuatro parámetros). Sin embargo, como todos los procesos de calibración y validación se basan en un pequeño conjunto de datos (sobre todo la validación, realizada con 5 datos), un dato erróneo puede modificar el análisis estadístico, y por eso consideramos que sería necesario realizar un mayor número de experimentos para rechazar de modo categórico la hipótesis de que la formación y cuajado de vainas es un proceso sensible al fotoperíodo. A la vista de las buenas predicciones de la fecha de formación de la primera vaina obtenidas con los modelos térmicos en el test independiente, se concluye que se puede confundir el efecto del fotoperíodo con el de bajas temperaturas (sobre todo en el segundo año), y que existen dos posibilidades: 1) que los días cortos provoquen un tiempo de retardo en la aparición de la primera vaina con valores de T_b razonablemente bajos ($+2$ a -2 °C), o 2) que la duración del día carezca de importancia y que el cuajado de las vainas así como el tiempo entre floración y aparición de primera vaina se retrase cuando

las temperaturas son bajas debido a la elevada T_b de este subperíodo fenológico de alrededor de 8 °C.

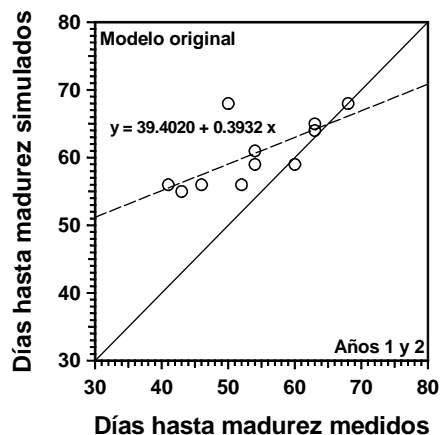
Por lo tanto, recomendamos de momento utilizar en el modelo sólo la sensibilidad a la temperatura ya que los resultados encontrados en este experimento son insuficientes para asegurar la influencia de la duración del día sobre esta fase, y que tampoco existe bibliografía que apoye dicha sensibilidad después de floración en esta especie.

2.3.7. Calibración de la predicción de la madurez fisiológica

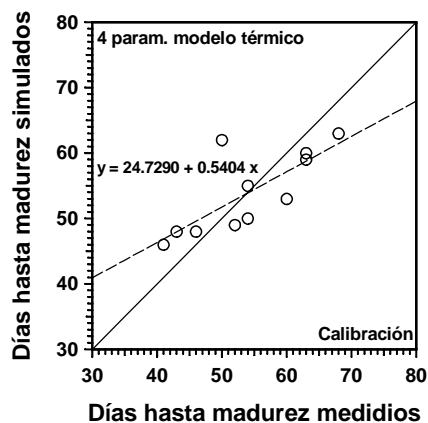
2.3.7.1. Modelo térmico original y coeficientes

En el modelo original (modelo 1 en la **Tabla 31**), las temperaturas cardinales son $T_b = 0.0$ °C, $T_{opt1} = 22$ °C y $T_{opt2} = 35$ °C, y la duración de la fase (SH-MF), calibrada con datos de dos años de experimentos en Córdoba (Boote *et al.*, 2002) es de 46.8 DPT. Con estos parámetros, las predicciones de la fecha de madurez fisiológica (MF) en los ensayos realizados en Lugo no fueron buenas: $d = 0.651236$, $SSE = 889 d^2$, y el análisis de regresión lineal entre días simulados y medidos desde primera vaina hasta madurez fisiológica dio una pendiente baja (0.3932) y un alto valor de ordenada en el origen (39.4020) (**Fig. 15a**).

(a)



(b)



(c)

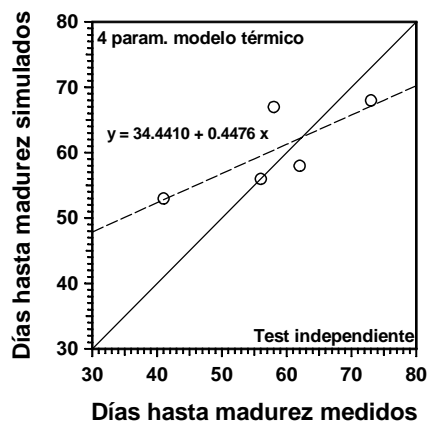


Fig. 15. Valores simulados *versus* valores medidos del número de días entre primera vaina y madurez fisiológica (a): años 1 y 2 con el modelo original ($T_b = 0^\circ\text{C}$; $T_{opt1} = 22^\circ\text{C}$; $T_{opt2} = 35^\circ\text{C}$; $T_x = 45^\circ\text{C}$; SH-PM = 46.8 DPT) y (b): con 4 param. modelo térmico ($T_b = 2.6^\circ\text{C}$; $T_{opt1} = 25.6^\circ\text{C}$; $T_{opt2} = 27.9^\circ\text{C}$; $T_x = 45^\circ\text{C}$ (fijo); SH-PM = 34.62 DPT); (c): test independiente con año 3 del 4 param. modelo térmico.

2.3.7.2. Modelos térmicos calibrados

En primer lugar, se optimizó la duración de la fase (SH-MF) aceptando los valores de las temperaturas cardinales que aparecen por defecto (modelo 2, en Tabla 31). Esto redujo la SSE de 889 a 360 d^2 y acortó la duración de la fase (SH-MF) de 46.8 a 41.4913 DPT. Optimizando cuatro parámetros, tres temperaturas cardinales (T_b , T_{opt1} y T_{opt2}) y SH, el SSE (modelo 5 en Tabla 30), se redujo a 323 d^2 . Sin embargo, cuando se reduce progresivamente el número de parámetros optimizados a 3 (fijando T_{opt2} en su valor original; modelo 4), 2 (fijando T_{opt1} y T_{opt2} ; modelo 3), y 1 (fijando T_b , T_{opt1} y T_{opt2} ; modelo 2), sólo se producen aumentos de SEE de pequeña magnitud. Además de la reducción de SSE, la optimización de la duración del subperíodo SH-MF y, sobre todo la optimización de la T_b , dio una mayor pendiente (b) y una ordenada en el origen (a) más cercana a cero (Tabla 31). Los valores optimizados de T_b , T_{opt1} , y T_{opt2} para el progreso de la primera vaina a la madurez, fueron: 2.6, 25.6 y 27.9 °C, respectivamente (**Fig. 15b**). Sin embargo, la calidad de las predicciones fueron peores que las obtenidas para la floración o la formación de la primera vaina. Como se puede observar en la figura, la pobre capacidad predictiva del modelo 5, se debe principalmente a uno de los datos (la primera fecha de siembra del experimento del segundo año) que contribuye en aprox. 45% del SSE. En esta fecha de siembra, transcurrió un largo periodo entre la observación de la primera vaina en una planta aislada hasta su aparición en al menos el 50% de las plantas (15 días de demora durante los cuales el tiempo fue bastante frío), mientras que para otras fechas de siembra, la diferencia (demora) entre el inicio y la plenitud de la fase fue inferior a 3 días. Este hecho podría haber contribuido a hacer más difícil, para este tratamiento, la determinación de la fecha real en la que se alcanzó el estadio de primera vaina y, de este modo, aumentar las posibilidades de error.

2.3.7.3. Modelos fotoperiódicos

Con el fin de dilucidar si SH-MF es un subperíodo fenológico del haba sensible o no a la duración del día, se llevaron a cabo dos conjuntos de optimizaciones: modelos PPSEN (optimización de PPSEN con CLDL fijado en 24.0 h; modelos 6, 7, 8 y 9 en Tabla 31) y modelos CLDL (optimización de PPSEN y CLDL; modelos 10, 11, 12 y 13). Estas optimizaciones permitieron sólo una pequeña reducción en SSE (de 323 d² en el modelo 5 a 321 d² en los modelos 6 y 10). Además, todos los modelos fotoperiódicos mostraron valores de PPSEN valores cercanos a 0 1/h. Ambos hechos refuerzan la hipótesis de que la duración del día no afecta el final de la fase reproductiva desde desarrollo de la primera vaina hasta la madurez.

2.3.8. Evaluación de la predicción de la madurez fisiológica frente a datos independientes

La evaluación de los diferentes modelos con datos independientes (tercer año de experimentación: 5 mediciones) confirma que los modelos térmicos pueden alcanzar al menos la misma exactitud en la predicción de la madurez fisiológica que los sensibles al fotoperíodo (**Tabla 31**). En realidad se consiguió el menor RMSEP con el modelo térmico de 4 parámetros (modelo 5) (**Fig. 15c**). Ello confirma que esta fase del cultivo no es dependiente de fotoperíodo. Hemos observado, al igual que en el proceso de calibración que la predicción de la precisión es peor que para las fases anteriores (la floración y la primera vaina). Esto puede atribuirse en parte a la mayor incertidumbre en la fijación de forma experimental (a través de observaciones) del punto de partida de la fase (aparición de la primera vaina), especialmente para la primera fecha de siembra de cada experimento. En algunos casos (es decir, primera fecha de siembra del tercer experimento) se observó una diferencia de hasta 30 días entre el inicio del estadio (20 % de las plantas con una vaina) y el momento en que más del 50 % tienen por lo menos una vaina.

Tabla 31. Precisión de diferentes submodelos de ocurrencia de la fase de madurez fisiológica con parámetros optimizados (sin paréntesis) o fijos [corchetes]. Las cifras entre paréntesis () debajo de un parámetro indican el error estándar de la optimización del mismo dentro de las 200 combinaciones de parámetros que consiguen el mejor ajuste.

	SH-MF (DT)	Tb (°C)	Topt1 (°C)	Topt2 (°C)	CLDL (h)	PPSEN (1/h)	SSE (d ²)	RMSE (d)	Índice-d.	a	b	RMSEP (d)	Índice-d.	a	b
	-----Calibración-----											-----Test Independiente-----			
1. Modelo original	[46.8]	[0]	[22]	[35]	-----	-----	889	8.990	0.651236	39.4020	0.3932	10.936	0.610169	45.1460	0.3596
2. 1 parm TH	41.4913 (0.0332)	[0]	[22]	[35]	-----	-----	360	5.721	0.806867	29.9530	0.4453	7.348	0.743833	37.9460	0.3596
3. 2 parm TH	37.9255 (0.531)	5.4565 (0.0810)	[22]	[35]	-----	-----	347	5.617	0.854629	22.0110	0.6042	8.379	0.747664	33.9600	0.4869
4. 3 parm TH	35.4439 (0.0454)	1.8538 (0.0278)	25.8407 (0.0428)	[35]	-----	-----	331	5.486	0.843202	25.4740	0.5299	7.537	0.760943	36.2530	0.4232
5. 4 parm TH	34.6263 (0.1090)	2.5610 (0.0491)	25.6125 (0.0723)	27.8959 (0.2138)	-----	-----	323	5.419	0.848712	24.7290	0.5404	7.294	0.782324	34.4410	0.4476
6. 5 parm ppsen	32.7755 (0.147953)	2.3648 (0.0971)	26.1458 (0.0675)	27.8632 (0.3863)	[24]	-0.004335 (0.000217)	321	5.402	0.847216	25.4740	0.5299	7.537	0.760943	36.2530	0.4232
7. 4 parm ppsen	33.3016 (0.0951)	-0.7388 (0.0298)	28.0974 (0.0650)	[35]	[24]	-0.004033 (0.000242)	329	5.469	0.832570	27.542	0.4883	7.523	0.730733	38.946	0.3596
8. 3 parm ppsen	28.4292 (0.3356)	4.6214 (0.1499)	[22]	[35]	[24]	-0.027566 (0.000891)	341	5.568	0.852061	22.942	0.5768	8.037	0.747459	35.041	0.4476
9. 2 parm ppsen	38.9765 (0.2772)	[0]	[22]	[35]		-0.006562 (0.000720)	355	5.681	0.809037	30.044	0.4453	7.681	0.708210	39.993	0.3277
10. 6 parm cldl-ppsen	32.5287 (0.0311)	2.4570 (0.0301)	25.8193 (0.0455)	27.8583 (0.0984)	23.8962 (0.1003)	-0.006163 (0.00081)	321	5.402	0.847216	25.474	0.5299	7.629	0.753	36.4880	0.4157
11. 5 parm cldl-ppsen	27.6604 (0.1319)	3.4756 (0.0421)	29.2698 (0.0893)	[35]	16.8861 (0.1083)	-0.034270 (0.001514)	328	5.461	0.862647	20.9820	0.608	8.136	0.755720	33.9950	0.4794
12. 4 parm cldl-ppsen	33.1619 (0.5940)	3.5275 (0.1231)	[22]	[35]	21.8666 (0.8255)	-0.020275 (0.001195)	341	5.568	0.843362	24.3660	0.5404	7.576	0.759026	35.6880	0.4157
13. 3 parm cldl-ppsen	40.4374 (0.4098)	[0]	[22]	[35]	18.4763 (1.1940)	-0.006795 (0.000976)	355	5.681	0.809037	30.044	0.4453	7.681	0.708210	39.9930	0.3277

2.4. CONCLUSIONES

1. La metodología utilizada con el programa temple simulado acoplado al CROPGRO-fababean, conjuntamente con datos de campo que proveen un amplio rango de condiciones ambientales logra ajustar los parámetros del modelo original (CROPGRO-fababean incluido en DSSAT 4.0), o de diferentes variantes del modelo original para permitir una buena predicción de la tasa de aparición de hojas y de los principales eventos fenológicos.
2. El proceso de validación, realizado con una base de datos independiente, confirma el apartado anterior y permite elegir el submodelo (correspondiente al proceso fenológico concreto, variante del original) más adecuado con sus parámetros correspondientes. Éste, no tiene por qué ser el submodelo que mejor ajuste consiguió durante el proceso de calibración.
3. Los parámetros óptimos varían considerablemente de un submodelo a otro.
4. El submodelo original de expansión de hojas conduce a un retraso sistemático en la predicción del momento de ocurrencia de expansión de la primera hoja. Para eliminar este error sistemático fue necesario eliminar la fase previa a la expresión del primer nudo TH2 (TH2 original = 4 DPT; ahora TH2 = 0 DPT) que procedía del modelo de soja CROPGRO-soybean. Todos los submodelos de expansión de hojas

probados requieren un aumento del valor original de TRIFOL (0.35 hoja/DPT). En los modelos térmicos, el TRIFOL retenido oscila entre 0.47 y 0.6 hoja/DPT, mientras que en los modelos fototérmicos TRIFOL tiende a ser más elevado y varía entre 0.59 y 0.79 hoja/DPT. Tanto en los submodelos térmicos de expansión de hojas, como en los fototérmicos probados, las predicciones de la tasa de expansión de hojas mejoran considerablemente con una temperatura base mayor que la presente en el submodelo original. Si se deja fluctuar T_b , En los modelos térmicos T_b pasa de 0 °C a 3.6 – 3.9 °C, mientras que en los modelos fototérmicos, T_b es algo más baja que en los anteriores, pasando de 0 °C a 2.1 – 2.4 °C. Tanto en los submodelos térmicos de expansión de hojas, como en los fototérmicos probados, si se dejan fluctuar los parámetros TRIFOL, T_b , y en su caso PPSEN, los valores de 23 °C para T_{opt1} y de 30 °C para T_{opt2} , valores por defecto del submodelo original ya descritos por otros autores en la literatura científica, son aceptables. Se asume el valor por defecto de $T_x = 40$ °C ya que la base de datos conseguida en campo no alcanza temperaturas suficientemente elevados para contrastar la valía de este parámetro. La inclusión del efecto del fotoperiodo en el submodelo de expansión de hojas permite sistemáticamente aumentar la precisión de las predicciones tanto en el proceso de calibración como en el de validación. Esto permite confirmar la hipótesis de que el alargamiento de los días estimula la tasa de expansión de hojas. Se retiene como uno de los submodelos más adecuados, el 3 param. modelo PPSEN, con los siguientes valores: TRIFOL = 0.70 hoja/DPT; $T_b = 2.2$ °C; $T_{opt1} = 23$ °C; $T_{opt2} = 30$ °C; $T_x = 40$ °C; CLDL = 24 h; PPSEN = -0.030 1/h).

5. La inclusión del efecto fotoperiodo en el submodelo, que predice la duración del subperíodo fenológico Emergencia-Floración, permite sistemáticamente aumentar de modo sensible la precisión de las predicciones tanto en el proceso de calibración como en el de validación. Esto permite confirmar la hipótesis, ampliamente aceptada en la literatura científica, de que el alargamiento de los días acelera la tasa de progresión hacia la floración en *Vicia faba* L. Todos los submodelos fototérmicos probados, que predicen la duración del subperíodo fenológico Emergencia-Floración, requieren una reducción del valor original de la duración del subperiodo EM-FL (23 DPT). En estos submodelos, EM-FL adopta valores comprendidos entre 11.1 y 17.4 DPT. En los submodelos fototérmicos probados, que predicen la duración del subperíodo fenológico Emergencia-Floración, en que el parámetro de sensibilidad al fotoperiodo PPSEN se deja fluctuar, cuando T_b no se mantiene constante, esta adopta valores claramente negativos (-4.4 – -3.8 °C) y, por tanto, se aleja bastante de su valor en el modelo original (0 °C). En los submodelos fototérmicos probados, que predicen la duración del subperíodo fenológico Emergencia-Floración, si se dejan fluctuar los parámetros EM-FL, T_b y PPSEN, los valores de 22 °C para T_{opt1} y de 26 °C para T_{opt2} , valores por defecto del submodelo original, ya descritos por otros autores en la literatura científica, son aceptables. Se asume el valor por defecto de $T_x = 45$ °C, ya que la base de datos conseguida en campo no alcanza temperaturas suficientemente elevados para contrastar la valía de este parámetro. Se retiene como uno de los submodelos más adecuados para predecir la duración del subperíodo fenológico Emergencia-Floración, el 5 param. modelo PPSEN, con los siguientes parámetros: EM-FL = 11.5 DPT; $T_b = -3.8$ °C; $T_{opt1} = 22.9$ °C; $T_{opt2} = 30.9$ °C; $T_x = 45$ °C; CLDL = 24 h; PPSEN = -0.053 1/h).

6. La inclusión del efecto fotoperiodo en el submodelo, que predice la duración del subperíodo fenológico Floración-Primera vaina, empeora la precisión de las predicciones en el proceso de validación y en consecuencia se rechaza la hipótesis de que el alargamiento de los días acelera la tasa de progresión hacia el estadio Primera vaina en el cv. Alameda de *Vicia faba* L. Todos los submodelos térmicos probados, que predicen la duración del subperíodo fenológico Floración-Primera vaina, requieren una reducción del valor original de la duración del subperíodo FL-SH (11 DPT). En estos submodelos, FL-SH adopta valores comprendidos entre 9.2 y 5.5 DPT. En los submodelos térmicos probados, que predicen la duración del subperíodo fenológico Floración-Primera vaina dejando fluctuar T_b , T_b adopta valores claramente positivos (5.5 – 9.2 °C) y, por tanto, se aleja mucho de su valor en el modelo original (0 °C). Este valor es atribuible al hecho de que durante periodos prolongados de bajas temperaturas, se observaron plantas en floración sin que se produjera ningún cuajado de vaina, probablemente debido a fallos en la polinización. En los submodelos térmicos probados que predicen la duración del subperíodo fenológico Floración-Primera vaina, si se dejan fluctuar los parámetros FL-SH y T_b , los valores de 22 °C para T_{opt1} y de 26 °C para T_{opt2} , valores por defecto del submodelo original, son aceptables. Se asume el valor por defecto de $T_x = 45$ °C, ya que la base de datos conseguida en campo no alcanza temperaturas suficientemente elevados para contrastar la valía de este parámetro. Se retiene como uno de los submodelos más adecuados para predecir la duración del subperíodo fenológico Floración-Primera vaina, el 4 param. modelo térmico, con los siguientes parámetros: FL-SH = 5.8 DPT; $T_b = 7.6$ °C; $T_{opt1} = 22.6$ °C; $T_{opt2} = 31.6$ °C; $T_x = 45$ °C).

7. La inclusión del efecto fotoperiodo en el submodelo que predice la duración del subperíodo fenológico Primera vaina-Madurez fisiológica, empeora la precisión de las predicciones en el proceso de validación y en consecuencia se rechaza la hipótesis de que el alargamiento de los días acelera la tasa de progresión hacia el estadio Madurez fisiológica en el cv. Alameda de *Vicia faba* L. Es un hecho ampliamente asumido por la literatura científica para la gran mayoría de los cultivos de grano. Todos los submodelos térmicos probados, que predicen la duración del subperíodo fenológico Primera vaina-Madurez fisiológica, requieren una reducción del valor original de la duración del subperiodo SH-MF (46.8 DPT). En estos submodelos, SH-MF adopta valores comprendidos entre 37.9 y 34.6 DPT. Más allá de la duración del subperiodo, la modificación de los demás parámetros (T_b , T_{opt1} y T_{opt2}) respecto de los originales no permite conseguir mejoras apreciables de las predicciones. Se retiene como uno de los submodelos más adecuados para predecir la duración del subperíodo fenológico Primera vaina-Madurez fisiológica, el 4 param. modelo térmico, con los siguientes parámetros: SH-MF = 34.6 DPT; $T_b = 2.6$ °C; $T_{opt1} = 25.6$ °C; $T_{opt2} = 27.9$ °C; $T_x = 45$ °C). La predicción la duración de la fase Primera vaina-Madurez fisiológica es de peor calidad que las demás fases (Emergencia-Floración, Floración-Primera vaina), posiblemente debido en parte a la mayor incertidumbre en la fijación de forma experimental del punto de partida de la fase, en particular para la primera fecha de siembra de cada experimento.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

ADISARWANTO, T., KNIGHT, R. 1997. Effect of sowing date and plant density on yield and yield components in the faba bean, Aust. J. Agric. Res., 48: 1161-1168.

AITKEN, Y. 1974. Flowering time, climate and genotype. Melbourne Agric. Press.

ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., SMITH, M. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper nº 56. FAO, Roma.

AGUNG, S., McDONALD, G.K. 1998. Effect of seed size and maturity on the growth and yield of faba bean (*Vicia faba* L.). Australian Journal of Agricultural Research, 49: 79 -88.

ARGAMENTERÍA, A., ROZA B. de la., MARTÍNEZ, A., VICENTE, F. 2004. Yield of intercropped of triticale and fava bean according to their developing state. Preliminary results. En: *Land Use Systems in Grassland Dominated Regions*. Proceedings of the European Grassland Federation. 20th General Meeting. Luzern (Switzerland).

ASPIAZU, C., SHAW, R.H. 1972. Comparison of several methods of growing-degree-unit calculations for corn (*Zea mays* L.). Iowa State Journal Science, 46: 435-442.

AYAZ, S., MCKENZIE, B., HILL, G., McNEIL, D. 2004. Variability in yield of four grain legume species in a subhumid temperate environment. II. Yield components. Journal of Agricultural Science, 142: 21-28.

BLACKMAN, V.H. 1919. The compound interest law and plant growth. Annals of Botany, 33: 353-360.

BOND, D.A., LAWES, D.A., HAWTIN, G.C., SAXENA, M.C., STEPHENS, J.S. 1985. Faba bean (*Vicia faba* L.). En: Summerfield, R.J., Roberts, E.H (eds.). Grain Legume Crops. William Collins Sons Co. Ltd. 8 Grafton Street, London, W1X 3LA, UK, p.199-265.

BOOTE, K.J., JONES, J.W., HOOGENBOOM, G. 1998. Simulation of crop growth: CROPGRO model. En: Peart, R.M., Curry, R.B. (eds.). Agricultural systems modelling and simulation. Marcel Dekker, New York, p.651-692.

BOOTE, K.J., JONES, J.W. MISHOE, J.W., WILKERSON, G.G. 1986. Modeling growth and yield of groundnut. En: Agrometeorology of Groundnut. Proceedings of an International Symposium, ICRISAT Sahelian Centre, Niamey, Niger, International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, Patancheru, India, p. 243-254.

BOOTE, K.J., JONES, J.W., PICKERING, N.B. 1996. Potential uses and limitations of crop models. Agronomy Journal, 98: 704-716.

BOOTE, K.J., MÍNGUEZ, M.I., SAU, F. 2002. Adapting the CROPGRO legume model to simulate growth of faba bean. *Agronomy Journal*, 94: 743 -756.

BOOTE, K.J., PICKERING, N.B. 1994. Modeling photosynthesis of row crops canopies. *HortScience*, 29: 1423-1434.

BOOTE, K.J., TOLLENAAR, D.M. 1994. Modeling genetic yield potential. En: Boote, K.J., Bennett, J.M., Sinclair, T.R., Paulsen, G.M. (eds.). *Physiology and determination of crop yield*. ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI., p. 533-565.

CALMON, M.A., BATCHELOR, W.D., JONES, J.W., RITCHIE, J.T., BOOTE, K.J., HAMMOND, L.C. 1999. Simulating soybean root growth and soil water extraction using a functional crop model. *Trans. ASAE*, 42:1867-1877.

CANDOLLE, A.I. de. 1855. *Géographie Botanique Raisonnée*, Maisson, Paris.

CASTRO, M.P., FLORES, G., GONZÁLEZ-ARRÁEZ, A., CASTRO, J., 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 química bromatológica del ensilado. III Reunión Ibérica de Pastos y Forrajes, p. 615-620.

CASTRO, M.P., PIÑEIRO, J. 1998. Efecto de la dosis de siembra de avena (*Avena sativa* L.) y veza común (*Vicia sativa* L.) en la producción, composición botánica y valor nutritivo de la asociación. XXXVIII Reunión Científica de la SEEP. Soria, p. 173-176.

CHARLES-EDWARDS, D.A., LAWN, R.J., 1984. Light interception by grain legume row crops. *Plant, Cell and Environment*, 7:247-251.

CHARLES-EDWARDS, D.A., DOLEY, D., THORPE, G.M., 1986. *Modelling plant growth and development*. Academic Press, New South Wales, 236 p.

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

COELHO, J.C., PINTO, P.A. 1989. Plant density effects on growth and development of winter faba bean (*Vicia faba* var. minor), *Fabis Newslett*, 25: 26-30.

CONFERENCIA EUROPEA. 2001. "Agricultura y alimentación ecológicas. Hacia una cooperación y acción en Europa", Copenhagen, Dinamarca. [On line] Disponible en: http://www.agroecologia.net/agroecologia/conf_euro.pdf (verificado el 15 Julio de 2004).

COSTA, L.C., DENNETT, M.D., MORISON, L.C. 1994. Variation in dark respiration during the growth of field bean (*Vicia faba* L.) under different soil water regimes and densities. *Resource capture by crops*. Nottingham University Press, 52: 402-405.

COSTA, W.A. de, DENNETT, M.D., RATNAWEERA, U., NYALEMEGBE, K. 1997. Effects of different water regimes on field-grown determinate and indeterminate faba bean (*Vicia faba* L.). *Fields Crops Research*, 49: 83-93.

CUBERO, J.I. 1974. On the evolution of *Vicia faba* L. *Theor. Appl. Genet.* **45**, pp. 47-51.

CUBERO, J.I. 1983. Origen, evolución y mejora genética de las leguminosas de grano. En: Cubero J.I, Moreno, M.T. (eds). *Leguminosas de grano*. MundiPrensa.

CUBERO, J.I. 1992. Las habas. I Jornadas Técnicas sobre Leguminosas de Grano. Palencia, p. 241-249.

DALE, J.E., MILTHORPE, F.L. 1983. *The growth and functioning of leaves*. Cambridge University Press, Cambridge, England.

DANTUMA, G., THOMPSON, R. 1983. Whole crop physiology and yield components. En: Hebblethwaite, P.D. (ed.). *The Faba Bean (Vicia faba L.)*. Butterworths, London, UK, p. 143-156.

DEMETRIADES-SHAW, T.H., M. FUCHS, E.T., KANEMASU, FLITCROFT, I. 1992. A note of caution concerning the relationship between cumulated intercepted solar radiation and crop growth. *Agric. For. Meteorol.* **58**:193-207.

DEMETRIADES-SHAW, T.H., M. FUCHS, E.T., KANEMASU, FLITCROFT, I. 1994. Further discussions on the relationship between cumulated intercepted solar radiation and crop growth. *Agric. For. Meteorol.*, **68**:231-242.

DÍAZ-AMBRONA, C.H., MÍNGUEZ, M.I. 2001. Cereal-legume rotations in a Mediterranean environment: Biomass and Yield Production. *Field Crops Research*, **70**: 139-151.

DUC, G. 1997. Faba bean (*Vicia faba* L.). *Field Crops Research*, **53**: 99 -109.

DUKE, J.A. 1981. *Handbook of legumes of world economic importance*. New York, Plenum Press, 125p.

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

EGLI, B.E. 1998. *Seed biology and the grain yield of grain crops*. CAB international. Oxford, Reino Unido, 178p.

ELLIS, R.H. 1998. Longevity of seeds stored hermetically at low moisture contents. *Seed Science Research* **8**, Suplemento N° 1, p. 9-10.

ELLIS, R.H., ROBERTS, E.H., SUMMERFIELD, R.J. 1988. Variation in the optimum temperature for rates of seedling emergence and progress towards flowering amongst six genotypes of faba bean (*Vicia faba*). *Annals of Botany*, **62**: 119-126.

ELLIS, R.H., SUMMERFIELD, R.J., ROBERTS, E.H. 1990. Flowering in Faba Bean: Genotypic Differences in Photoperiod Sensitivity, Similarities in Temperature Sensitivity, and Implications for Screening Germplasm. *Annals of Botany*, **65**: 129-138.

ERBS, D.G., KLEIN, S.A., DUFFIE, J.A. 1982. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly average global radiation. *Solar Energy Alternatives for Agriculture*, 28: 293 - 302.

ESPOSITO, W.R., FLOUDAS, C.A. 1998. Global optimization in parameter estimation of nonlinear algebraic models via the error-in-variables approach. *Ing. Eng. Chem. Res.* 37, 1841-1858

EVANS, L.T. 1959. Environmental control of flowering in *Vicia faba* L. *Annals of Botany*, 23: 521-546.

FAO. 2006. FAO Statistical Yearbook 2005-2006. [On line] Available at: http://www.fao.org/statistics/yearbook/vol_1_1/index.asp (verified 11 Jul. 2008).

FEHR, W.R., CAVINESS, C.E., BURMOOD, D.T., PENNINGTON, J.S. 1971. Stage of development descriptions for soybeans, *Glycine max* (L.) Merrill. *Crop Science*, 11:929-931.

FERNÁNDEZ-LORENZO, B., FLORES, G., GONZÁLEZ-ARRÁEZ, A., VALLADARES, J., CASTRO, P. 2006. Comparación de las rotaciones forrajeras guisante-triticale/maíz y raigrás italiano/maíz. En: *Los Sistemas Forrajeros: entre la Producción y el Paisaje*. Actas de la XLVI Reunión Científica de la SEEP. Ed. Neiker. Vitoria. España, p. 223-230.

FLORES, G., GONZÁLEZ, A., PIÑEIRO, J., CASTRO, P., DÍAZ, A., VALLADARES, J. 2003. Composición química y digestibilidad in vitro del guisante forrajero (*Pisum sativum* L.) y triticale (*x Triticosecale* Wittm.) como cultivos invernales en seis fechas de corte en primavera. En: *Pastos, desarrollo y conservación*. Actas de la XLIII Reunión Científica de la SEEP. Ed. A. B. Robles, M^a E. Ramos, M^a C. Morales, E. de Simón, J. L. González, J. Boza. Junta de Andalucía. Granada. España, p.261-267.

FORRESTER, J. W. 1972. *Dinámica industrial*. El Ateneo. Buenos Aires.

FUSHEUN, A., DENNETT, M.D. 1982. Interception of radiation and growth efficiency in field beans (*Vicia faba* L.) *Agricultural Meteorology*, 26: 221-229.

GALLAGHER, J.N., BISCOE, P.V. 1978. Radiation absorption, growth and yield of cereals. *Journal of Agricultural Science, New Delhi*, 91: 47- 60.

GARDNER, F., PEARCE, R., MITCHELL, R. 1985. *Physiology of Crop Plants*. Ames IA: Iowa State University Press. 312p.

GAU C.Y., BRENNECKE J.F., STADTHERR M.A. 2000. Reliable nonlinear parameter estimation in VLE modeling. *Fluid Phase Equilibria*, 168: 1-18

GRASHOFF, C. 1990. Effect of pattern of water supply on *Vicia faba* L. 1. Dry matter partitioning and yield variability. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 38: 21- 44.

GRAF, R.J., ROWLAND, G.G. 1987. Effect of plant density on yield and components of yield of faba bean. *Canadian Journal of Plant Science*, 67: 1-10.

GODWIN, D.C., JONES, C.A. 1991. Nitrogen dynamics in soil-plant systems. En: Hanks, J., Ritchie, J.T. (eds.) *Modeling Soil and Plants Systems*. ASA Monograph 31, American Society of Agronomy. Madison, WI, EEUU.

GODWIN, D.C., RITCHIE, J.T., SINGH, U., HUNT, L. 1989. A user's guide to CERES Wheat. V2.10. International Fertilizer Development Center, Muscle Shoals. AL, EEUU.

GOFFE, W.L., G.D. FERRIER, ROGERS, J. 1994. Global optimization of statistical functions with simulated annealing. *Journal of Econometrics*, 60: 65-99

GOUDRIAN, J., MONTEITH, J.L. 1990. A mathematical function for crop growth based on and leaf area expansion. *Annals of Botany*, 66: 695-701.

GOYNE, P., HAMMER, G. 1982. Phenology of sunflower cultivars II. Controlled-environment studies of temperature and photoperiod effects *Australian J. Res.*, 33: 251-261.

GRIMM, S.S., JONES, J.W., BOOTE, K.J., HESKETH, J.D. 1993. Parameter estimation for predicting flowering date in soybean cultivars. *Crop Sci.* 33: 137-144.

HADLEY P., SUMMERFIELD R.J., ROBERTS E.H. 1983. Effects of temperature and photoperiod on reproductive development of selected grain legume crops. En: Davies D.R., Jones D.G., eds. *Temperate legumes: The physiology, genetics and nodulation*. London: Pitman Publishing Ltd, p.19-41.

HAY, R.K., WALKER, A.J. 1989. An introduction to the physiology of crop yield, London: Longman Scientific & Technical, 465p.

HEBBLETHWAITE, P.D. 1983. *The Faba Bean (Vicia faba L.)*. London, UK, 573 p.

HESLOP-HARRISON, J., HESLOP-HARRISON, Y., SHIVANNA, K.R. 1984. The evaluation of pollen Quality, and a further appraisal of the fluorochromatic (FCR) test procedure. *Theor. Appl. Genet.*, 67: 367-375.

HODGES, T. 1991. Crop growth simulation and the role of phenological models. En: Hodges, T. (ed.). *Predicting Crop Phenology*. CRC Press. Boca Raton, FL, EEUU, p.3-6.

HOOGENBOOM, G., WHITE, J.W., JONES, J.W., BOOTE, K.J. 1990. BEANGRO V1.0: Dry bean crop growth simulation model. User's Guide. *Fl. Agri. Exp. Sta. J.*, nº. N-00379. Univ. de Florida, Gainesville, EEUU.

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., WHITE, J.W. 1994. Crop models. En: Tsuji, G.Y.,

Uehara, G., Balas, S. (eds.). DSSAT Version 3, Volume 2. University of Hawaii. Honolulu, HI, EEUU.

HOWIESON, J.G., O'HARA, G.W., CARR, S.J. 2000. Changing roles for legumes in Mediterranean agricultura: developments from Australian perspectiva. *Field Crops Research*, 65: 107-122.

HUNT, R. 1982. *Plant growth curves: the functional approach to plant growth analysis*. London: E. Arnold, 248 p.

HUNT, L.A., PARARAJASINGHAM, S., JONES, J.W., HOOGENBOOM, G.N., IMAMURA, D.T., OGOSHI, R.M. 1993. GENCALC - Software to facilitate the use of crop models for analyzing field experiments. *Agron. J.*, 85: 1090-1094

HUSAIN, M.M., HILL, G.D., GALLAGER, J.N. 1988. The response of field beans (*Vicia faba* L.) to irrigation and sowing date. *Journal of Agricultural Science*, 111: 233-254.

IBSNAT-INTERNATIONAL BENCHMARK SITES NETWORK FOR AGROTECHNOLOGY TRANSFER. 1988. *Experimental Design and DATA Collection Procedures for IBSNAT*. Technical Report 1.

IBSNAT-INTERNATIONAL BENCHMARK SITES NETWORK FOR AGROTECHNOLOGY TRANSFER. 1993. *The IBSNAT decade*. Dept. of Agronomy and Soil Science, College of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawaii. Honolulu, HI 96822, EEUU.

IGLESIAS, I., LLOVERAS, J. 1998. J. Annual cool-season legumes for forage production in mild winter areas. *Grass and Forage Science*, 53: 318-325.

JACOBSON, B.M., JONES, J.W., WELCH, S.W. 1995. Decision support system to assess agronomic, economic, and environmental impacts of soybean and corn management. ASAE paper nº 952696, St. Joseph, MI, EEUU, 17 p.

JONES, J.W., BOOTE, K.J. 1987. Simulation models for soybeans and other crops. Concepts of crop systems. Technical bulletin 106. Food and fertilizer technology center. Taipei City, Taiwan. p.1-7.

JONES, J.W., BOOTE, K.J., HOOGENBOOM, G., JAGTAP, S.S., WILKERSON, G.G. 1989. SOYGRO V5.42, Soybean Crop Growth Simulation Model. User's Guide. Fl. Agric. Exp. Sta., Journal Nº 8304. University of Florida. Gainesville, Florida, EEUU, 75 p.

JONES, J.W., HOOGENBOOM, G., PORTER, C.H., BOOTE, K.J. BATCHELOR, W.D. et al. 2003. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 18: 235-265.

JONES, C.A., LUYTEN, J.C. 1998. Simulation of biological processes. En: R. Peart, M., Curry, R.B. (eds). *Agricultural systems modelling and simulation*. Marcel Dekker, Nueva York, p.19-62.

JONES, J.W., RITCHIE, J.T. 1991. Crop growth models En: Hoffman, G.J., Howell, T.A., Solomon, K.H. (eds.). Management of farm irrigation systems, American Society for Agricultural Engineering, p. 63-89.

JONES, J.W., TSUJU, G.Y., HOOGENBOOM, G., HUNT, L.A., THORNTON, P.K., WILKENS, P.W., IMAMURA, D.T., BOWEN, W.T., SINGH, U. 1998. Decision Support System for Agrotechnology Transfer, DSSAT v3. En: G.Y. Tsuji, G.Y. (ed.). Understanding options for agricultural production. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands. p. 157-177.

KATYAR, R.P., SINGH, A.K. 1990. Path coefficient studies for yield and yield components in faba bean, *Fabis Newslett*, 26: 3-5.

KEATINGE, J.D.H, QI, A., WHEELER, T.R., ELLIS, R.H, SUMMERFIELD R.J. 1998. Effects of temperature and photoperiod on phenology as a guide to the selection of annual legume cover and green manure crops for hillside farming systems. *Field Crops Research*, 57: 139-152.

KEULEN, H. VAN. 1975. Simulation of water use and herbage growth in arid regions. *Simulation Monographs*. PUDOC. Wageningen, Holanda, 176 p.

KINIRY, J.R., JONES, C.A., O'TOOLE, J.C., BLANCHET, R., CABELGUENNE, M., SPANEL, D.A., 1989. Radiation-use efficiency in biomass accumulation prior to grain-filling for five grain-crop species. *Field Crops Research*, 20: 51-64.

KIMBALL, B.A., BELLAMY, L.A. 1986. Generation of diurnal solar-radiation, temperature, and humidity patterns. *Energy in Agriculture*, 5: 185 -197.

KIRKPATRICK, S., GERLATT, C.D.J., VECCHI, M.P. 1983. Optimization by simulated annealing. *Science*, 220: 671-680.

KÖPPEN. 1931. *Grundrisse der Klimakunde*. Berlin, Walter de Gruyter Co.

LAARHOVEN, P.J. VAN, AARTS, E.H. 1987. *Simulated Annealing: Theory and Applications*, Springer, ISBN: 9027725136

LEMAIRE, G, MEYNARD, J.M. 1997. Use of the nitrogen nutrition index for the analysis of agronomical data. In:Lemaire G (ed.). *Diagnosis of the nitrogen status in crops*. Berlin (German): Springer Verlag. 45 p.

LEPORT, L. TURNER, N.C., FRENCH, R.J., THOMSON, B.D. 1998. Water relations, gas exchange and growth of cool-season grain legumes in a Mediterranean-type environment. *European Journal of Agronomy*, 9: 295-203.

LINDQUIST, J.L, ARKEBAUER, T.J., WALTERS, D.T., CASSMAN K.G., DOBERMANN, A. 2005. Maize Radiation Use Efficiency under Optimal Growth Conditions. *Agron. J.*, 97: 72-78.

LIST, R.J. 1971. Smithsonian Meteorological Tables. Smithsonian Institution, Washington, D.C.

LIZASO, J.I., BATCHELOR, W.D., ADAMS, S.S. 2001. Alternate approach to improve kernel number calculation in CERES-Maize. Trans. ASAE, 44:1011-1018.

LOOMIS, R.S., 1983. Crop manipulations for efficient use of water: an overview, En: Taylor, H.M., Jordan, W.R., Sinclair, T.R. (eds.). Limitations to efficient water use in crop production. American Society of Agronomy, Inc. p. 345-347.

LOOMIS, R.S., CONNOR, D.J. 1992. Crop Ecology. Productivity and management in Agricultural Systems. Cambridge University Press, Cambridge.

LOPEZ-BELLIDO, F.J., LOPEZ-BELLIDO, L., LOPEZ-BELLIDO, R.J. 2005. Competition, growth and yield of faba bean (*Vicia faba* L.). European Journal of Agronomy, 23: 359-378.

LÓPEZ-BELLIDO, L. 2006. El papel de las leguminosas en la sostenibilidad de la agricultura mediterránea: ilusión o realidad. In Nuevos retos y oportunidades de las leguminosas en el sector agroalimentario español (eds. M. de los Mozos Pascual, M.J. Giménes Alvear, M.F. Rodríguez Conde y R. Sánchez Vioque), Consejería de Agricultura de Castilla-La Mancha, Toledo, 29-50.

LOPEZ CEDRÓN, F.X. 2006. Intensificación de la producción forrajera en Galicia y evaluación del modelo Ceres-Maize. Tesis Doctoral. Escola Politécnica Superior, Universidad de Santiago de Compostela, 158p.

LOSS, S.P., SIDDIQUE, K.H.M. 1997. Adaptation of faba bean (*Vicia faba* L.) to dryland Mediterranean-type environments. I. Seed yield and yield components. Field Crops research, 52: 17-28.

LOSS, S.P., SIDDIQUE, K.H.M., MARTIN, L.D., 1997. Adaptation of faba bean (*Vicia faba* L.) to dryland Mediterranean-type environments II. Phenology, canopy development, radiation absorption and biomass partitioning. Field Crop Research, 52: 29-41.

MADEIRA, A.C., CLARK, J.A., ROSSALL, S. 1988. Growth, light interception and disease in field bean (*Vicia faba*): the effect of late infection by *Ascochyta fabae*. Annals of Applied Biology, 112: 585 - 595.

MANSCHADI, A.M., SAUERBORN, J., STUTZEL, H., GOBEL, W., SAXENA, M.C. 1998. Simulation of faba bean (*Vicia faba* L.) growth and development under Mediterranean conditions: Model adaptation and evaluation. Eur. J. Agron., 9:273-293.

MARTÍNEZ, A., ARGAMENTERÍA, A., ROZA, B. de la. 2000. Obtención de un forraje equilibrado en energía y proteína mediante la asociación maíz-leguminosa forrajera. En: Actas de la III Reunión Ibérica de Pastos y Forraje, Bragança, Portugal, p. 493-498.

MARTÍNEZ, A., ARGAMENTERÍA, A., ROZA B. de la, MARTÍNEZ, A. 2002. Mezcla cereal-leguminosa como forraje invernal en zonas húmedas. En: Actas de la XLII Reunión Científica de la Sociedad Española para el Estudio de los Pastos, p.315 - 320.

MARTÍNEZ, A., PEDROL, N. 2006. Manejo de forrajes invernales para rotaciones de cultivos. Tecnología Agroalimentaria, 3. Publicaciones del SERIDA.

MARTÍNEZ, A., PEDROL, N., PIÑEIRO, J. 2005a. Cultivares de haboncillo (*Vicia faba* L.) y triticale (*x Triticosecale* Wittm.) para producción de forraje invernal en zonas húmedas con mezclas cereal-leguminosa. En: Actas de la XLV Reunión Científica de la Sociedad Española para el Estudio de los Pastos, p.673-679.

MARTÍNEZ, A., ROZA, B., de la, SOLDADO, A., ARGAMENTERÍA, A. 2005b. Evaluación de producción y valor nutritivo de las habas forrajeras como alternativa al raigrás italiano utilizadas como cultivo de invierno en rotación con el maíz. En: Actas de la XLV Reunión Científica de la Sociedad Española para el Estudio de los Pastos, p.681-688.

MASSIGNAM, A., ANGELOCCI, L. 1993. Relacoes Entre Temperatura do Ar, Disponibilidade Hidrica No Solo, Fotoperiodo e Duracao de Subperiodos Fenologicos do Girassol. Revista brasileira de Agrometeorologia, 1:105-116.

MATEO-BOX, J. M. 1961. Leguminosas de grano. Ed. Salvat., Barcelona

McCREE, K.J. Mc. 1974. Equations for the rate of dark respiration of white clover and grain sorghum as functions of dry weight, photosynthetic rate, and temperature. Crop Science, 14: 509-514.

McDONALD, G.K., ADISARWANTO, T., KNIGHT, R. 1994. Effect of time of sowing on flowering in faba bean (*Vicia faba*). Australian Journal of Experimental Agriculture, 34: 395 - 400

METROPOLIS, N., ROSENBLUTH, A.W., ROSENBLUTH, M.N., TELLER, A.H., TELLER, E. 1953. Equation of state calculation by fast computing machines. Journal of Chemistry Physics, 21: 1087-1091.

MILTHORPE F.L., MOORBY J. 1979. An introduction to crop physiology. Cambridge University Press. Cambridge.

MÍNGUEZ , M.I., RUIZ-NOGUEIRA, B., SAU, F. 1993. Faba bean productivity and optimum canopy development under a Mediterranean climate. Field Crop Research, 22: 435 - 447.

MITCHELL, P.L., J.E. SHEEHY, WOODWARD, F.I. 1998. Potential yields and the efficiency of radiation use in rice. IRRI Discussion Paper Ser. 32. IRRI, Manila, Philippines.

MONSI, M., SAEKI, T. 1953. Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. Japanese Journal of Botany, 14: 22-52.

MONTEITH, J.L. 1969. Light interception and radiative exchange in crop stands. En: Eastin, J.D., Haskins, F.A., Sullivan, C.Y, Van-Bavel C.H. (eds), Physiological Aspects of Crop Yield. American Society of Agronomy, p. 89-111.

MONTEITH, J.L. 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. Philos. Trans. R. Soc. London Ser. B., 281: 227-294

MONTEITH, J.L. 1994a. Principles of resource capture by crop stands. En: Monteith, J.L., Scott, R.K., Unsworth, M.H.(eds). Resource capture by crops. Nottingham: Nottingham University Press, p.1-15

MONTEITH, J.L. 1994b. Validity of the correlation between intercepted radiation and biomass. Agricultural and Forest Meteorology, 68: 220- 231.

MOOT, D.J. 1997. Theoretical analysis of yield of field pea (*Pisum sativum* L.) crop using frequency distributions for individual plant performance. Annals of Botany, 79: 429-437.

MUNIER-JOLAIN, N., NEY, B. 1998. Seed growth rate in grain legumes. II. Seed growth rate depends on cotyledon cell number. Journal of Experimental Botany, 49: 1971-1976.

MWANAMWENGE, J., LOSS, S.P., SIDDIQUE, K.H.M., COCKS, P.S. 1999. Effect of water stress during floral initiation, flowering and podding on the growth and yield of faba bean (*Vicia faba* L.) European Journal of Agronomy, 11:1-11.

NACHI, N., LE GUEN, J. 1996. Dry matter accumulation and seed yield in faba bean (*Vicia faba* L.) genotypes. Agronomie, 16: 47-59.

NADAL, S., MORENO, M., MARTINEZ, C., CUBERO, J. 2004a. El redescubrimiento de una leguminosa: los arvejones (*Vicia narbonensis*). Agricultura: Revista agropecuaria, n. 864, p. 584-585.

NADAL S., MORENO, M., CUBERO, J. 2004 b. Algarrobas (*Vicia monanthos* (L.) Desf.) y alberjones (*Vicia narbonensis* L.) En: Las leguminosas de grano en la agricultura moderna, Junta de Andalucía. Consejo de Agricultura y Pesca. Mundiprensa. España, p.231-238.

NEWTON, S.D, HILL, G. D. 1977. The effect of time of sowing and density on pod position and yield. of two cultivars of field bean (*Vicia faba* L.). Proceedings of Agronomy Society of New Zealand, 7:57-63.

PARTON, W.J., LOGAN, J.A. 1981. A model for diurnal variation in soil and air temperature. Agricultural and Forest Meteorology, 23: 205-216.

PEDROL, N., MARTÍNEZ, A. 2003. Asociaciones cereal-leguminosa en rotaciones forrajeras ecológicas de zonas húmedas. En: Pastos, desarrollo y conservación, 131 – 136. Eds. A. Robles, M. Ramos, E. Morales , E. Simón.

Sociedad Española para el estudio de los Pastos y Consejería de Agricultura y Pesca. Sevilla (España).

PENNING DE VRIES, F.W.T., BRUNSTING, A.B., LAAR, H.H. VAN. 1974. Products, requirements and efficiency of biological synthesis, a quantitative approach. *Journal of Theoretical Biology*, 45: 339-377.

PENNING DE VRIES, F.W.T., LAAR, H.H. VAN. 1982. Simulation of growth processes and the model BACROS. En: Kropff A. (ed.) *Simulation of plant Growth*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Holanda.

PÉREZ, J.A., ARIAS, A.M., CASTRO, O., CUETO, B., GARCÍA, B., GARCÍA, J.L., MACHADO, A., FERNÁNDEZ, F.L., YÁÑEZ, L. 2002. Evaluación económico-financiera de los Planes de Mejora en las ganaderías de leche de Asturias. Informe final del Proyecto CICYT 1FD97-1015. Ed. Universidad de Oviedo (España), 603p.

PILBEAM, C.J., DUC, D., HEBBLETHWAITE, P.D. 1990. Effects of plant population density on spring-sown field beans (*Vicia faba*) with different growth habits. *Journal of Agricultural Science*, 114: 19-33.

PILBEAM, C.J., HEBBLETHWAITE, P.D., NYONGESA, T.E., RICKETTS, H.E. 1991. Effects of plant population density on determinate and indeterminate field beans (*Vicia faba*). *Journal of Agricultural Science*, 114: 339-352.

PILBEAM, C.J., AKASTSE, J.K., HEBBLETHWAITE, P.D., WRIGTH, S.D. 1992. Yield production in two contrasting forms of spring-sown faba bean in relation to water supply. *Field Crops Research*, 29: 273-287.

PLANCQUAERT, P., GIRARD, C. 1987. La feverole d'hiver: Culture-utilisation. *French Ext. Inf. Bull. UNIP, ITCF, and FNAMS*, Paris.

PLIES-BALZER, E., KONG, T., SCUBERT, S., MENGEL, K. 1995. Effect of water stress on plant growth, nitrogenase activity and nitrogen economy of four different cultivars of *Vicia faba* L. *European Journal of Agronomy*, 4: 167-173.

POULAIN, D., CONNEN, C., 1992. Influence of sowing date on the yield elaboration of a field bean crop. Comparison between a winter type (cv. Faviola) and spring type (cv. Alfred). In: AEP (Ed.), *Proceeding of the First European Conference on Grain Legumes*, 1-3 June, Angers, France, p. 271-272.

QI, A., WHEELER, T.R., KEATINGE, J.D.H., ELLIS, R.H., SUMMERFIELD, R.J., CRAUFURD, P.Q. 1999. Modelling the effects of temperature on the rates of seedling emergence and leaf appearance in legume cover crops. *Exp. Agric.* 35:327-344.

REES, R.O., RICHARDS, R., FARIS, F. 2000. World and regional trade: quantity versus quality. En: Knight, R. (ed.). *Linking research and marketing opportunities for pulses in the 21st century*. Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, The Netherlands. p.143-154.

RENGASAMY, J.I., REID, J.B. 1993. Root system modification of faba beans (*Vicia faba* L.) and its effects on crop performance. *Field Crop Research*, 33: 175-196.

RICHARDS, F.J. 1959. A flexible growth function for empirical use. *Journal of Experimental Biology*, 10:290-300.

RIDAO, E., OLIVEIRA, J.R., CONDE, J.R., MINGUEZ, M.I. 1996. Radiation interception and use, and spectral reflectance of contrasting canopies of autumn sown faba beans and semi-leafless peas. *Agricultural and Forest Meteorology*, 79: 193-203.

RITCHIE, J.T. 1972. A model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resources Res.* 8:1204-1213.

RITCHIE, J.T. 1985. A user-oriented model of the soil water balance in wheat. En: Fry, E. y Atkin, T.K. (eds.). *Wheat Growth and Modeling*. Plenum Publishing Corporation, NATO-ASI Series, p. 293-305.

ROBERTS, E.H., SUMMERFIELD, R.J. 1987. Measurement and prediction of flowering manual crops. En: Atherton, J.G. (ed.). *Manipulation of flowering*. Butterworths, London, p. 17-50.

ROBERTSON, G.W. 1968. A biometeorological time scale for a cereal crop involving day and night temperatures and photoperiods. *International Journal of Biometeorology*, 12: 191-223.

ROYCE, F.S., JONES, J.W., HANSEN, J.W. 2001. Model-based optimization of crop management for climate forecast applications. *ASAE*, 44:1319-1327.

ROZA, B. de la, MARTÍNEZ, A., ARGAMENTERÍA, A. 2002. Efectos de la asociación maíz-soja forrajera sobre producción y valor nutritivo. Calidad fermentativa de los ensilados resultantes. En: *Actas del V Congreso de la SEAE-I Congreso Iberoamericano de Agroecología*, Gijón, España, p. 1245-1252

ROZA, B. de la, MARTÍNEZ, A., SOLDADO, A., ARGAMENTERÍA, A. 2004. Evolución de la producción y ensilabilidad de la asociación triticale-haboncillos, según su estado de desarrollo. En: *Actas de la XLIV reunión Científica de la Sociedad Española para el estudio de los pastos*, Salamanca, España, p. 273- 277.

RUIZ-RAMOS, M. 2003. Alameda: un modelo estructural-funcional del cultivo de *Vicia faba* L. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.

RUIZ-RAMOS, M., MINGUEZ, M.I. 2006. ALAMEDA, A structural-functional model for faba-bean crops: morphological parametrisation and verification. *Annals of Botany*, 97: 377-388.

RUSSEL, G., JARVIS, P.G., MONTEITH, J.L. 1989. Absorption by canopies and stand growth. En: RusseL, G., MarschalL, B., JarviS, P.G. (Eds.). *Plant canopies: their growth, form and function*. Cambrige: Cambridge University Press, p.21-39.

SAU, F. 1989. Influencia de la nutrición nitrogenada sobre la respuesta al déficit hídrico en soja y habas. Tesis doctoral. Universidad de Córdoba.

SAU, F., MÍNGUEZ, M.I. 2000. Adaptation of indeterminate *faba beans* to weather and management under a Mediterranean climate. *Field Crop Research*, 66: 81-99.

SAXENA, M.C., HAWTIN, G.C., EL-IBRAHIM, H. 1981. Aspects of faba bean ideotypes for drier conditions. In. '*Vicia faba*: Physiology and Breeding'. (Ed. R. Thompson). Martinus Nijhof Publishers, The Hague, The Netherlands, p.210-231.

SIAM - Sistema de Información ambiental de Galicia. Consellería de Medio Ambiente, URL: <http://www.siam-cma.org:8080/meteorologia/resumos.jsp> [1 de octubre 2005].

SIDDIQUE, K., LOSS, A., ENNEKING, D. 1996. Narbon bean (*Vicia narbonensis* L.): a promising grain legume for low rainfall areas of south-western Australia. *Australian J. of Exp. Agric.*, 36:53-62.

SILIM, S.N., SAXENA, M.C. 1993. Yield and water use efficiency of faba bean sown at two row spacings and seed densities. *Expl. Agric.*, 29: 173-181.

SINCLAIR, T.R., MUCHOW, R.C. 1999. Radiation Use Efficiency. *Advances in Agronomy*, 65: 215-265.

SINHA, S.K. 1978. Las leguminosas alimenticias: su distribución su capacidad de adaptación y biología de los rendimientos. Estudio FAO: producción y protección vegetal. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma

SNEDECOR, G., COCHRAN, W. 1989. *Statistical Methods*, Eighth Edition, Iowa State University Press.

SPITTERS, C.J.T., TOUSSAINT, H.A.J., GOUDRIAAN, J. 1986. Separating the diffuse and direct components of global radiation and its implications for modelling canopy photosynthesis. Part I. Components of incoming solar radiation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 38: 217-229.

STEINMAUS, S.J., PRATHER, T.S., HOLT, J.S. 2000. Estimation of base temperatures for nine weed species. *Journal of Experimental Botany*, 51:275-286.

STÜTZEL, H. 1995a. A simple model for simulation of growth and development in faba beans (*Vicia faba* L.): I. Model description. *Eur. J. Agron.*, 4:175-185.

STÜTZEL, H. 1995b. A simple model for simulation of growth and development in faba beans (*Vicia faba* L.): II. Model evaluation and application for the assessment of sowing date effects. *Eur. J. Agron.*, 4:187-195.

STÜTZEL, H., AUFHAMMER, W. 1991. Light interception and utilization in determinate and indeterminate cultivars of *Vicia faba* under contrasting plant distributions and population densities. *Journal of Agricultural Science*, 116: 395- 407.

STÜTZEL, H., AUFHAMMER, W. 1992. Grain yield in determinate and indeterminate cultivars of *Vicia faba* with different plant distribution patterns and population densities. *Journal of Agricultural Science*, 118: 343-352.

SUÁREZ, R., DÍAZ, N., PIÑEIRO, J., SANTOALLA, C. 2002. Avena, centeno y triticale como tutores de guisante y veza en rotaciones forrajeras ecológicas. *Actas del V Congreso de la Sociedad Española de Agricultura Ecológica*. 16-21 Septiembre 2002. Gijón (España), p.701-710.

SUÁREZ, R., DÍAZ, N., PIÑEIRO, J., SANTOALLA, C. 2003. Variedades de avena, centeno y triticale en rotaciones forrajeras convencionales y ecológicas. En: *Pastos, desarrollo y conservación*, Eds. A.B. ROBLES, M^a.E. RAMOS, M^a.C. MORALES, E. SIMÓN, J.L.GONZÁLEZ, J. BOZA. Sociedad Española para el Estudio de los Pastos y Consejería de Agricultura y Pesca. Sevilla (España), p.193-199.

SUMMERFIELD, R.J., ROBERTS, E.H. 1985. Recent trends in internationally oriented research on grain legumes. En: R.J. Summerfield and E.H. Roberts (eds.), *Grain Legume Crops*. Collins, London, UK, p. 801-846.

SUMMERFIELD, R.J., ROBERTS, E.H. 1988. Photo-thermal regulation of flowering in pea, lentil, faba bean and chickpea. En: Summerfield R.J. (ed.). *World crops: Cool season food legumes*. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, p. 911-922.

SUMMERFIELD, R.J., ELLIS, R.H., ROBERTS, E.H., QI, A. 1991. Measurement, prediction and genetic characterisation of flowering in *Vicia faba* and *Pisum sativum*. *Aspects of Applied Biology*, 27:253-261.

SZEICZ, G. 1974. Solar radiation for plant growth. *Journal of Applied Ecology*, 2: 617- 636.

THORNLEY, J.H.M., JOHNSON, J.R. 1990. *Plant and Crop Modelling. A Mathematical Approach to Plant and Crop Physiology*. Clarendon Press. Oxford.

TURNER, N. 2004. Agronomic options for improving rainfall-use efficiency of crops in dryland farming Systems. *Journal of Experimental Botany*, 55: 2413-2425.

TURPIN, J.E., ROBERTSON, M.J., HILLCOAT, N.S., HERRIDGE, D.F. 2002. Fababean (*Vicia faba*) in Australia's northern grains belt: canopy development, biomass, and nitrogen accumulation and partitioning. *Australian Journal of Agricultural Research*, 53:227-237.

TSUJI, G.Y. 1998. Network management and information dissemination for agrotechnology transfer. En: Tsuji, G.Y., Hoogenboom, G., Thornton, P.K. (eds). *Understanding Options for Agricultural Production*. Kluwer Academic, p. 367-381.

UEHARA, G. 1998. Synthesis. En: Tsuji, G.J.; Hoogenboom, G.; Thornton, P.K. (eds.). *Understanding Options for Agricultural Production*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, p. 389-392.

UNION EUROPEA. 2003. Agriculture and environment. Ed: Eugene LEGUEN DE LACROIX, European Commission, Directorate-General for Agriculture. [On line] Available at: <http://europa.eu.int/comm/agriculture/index.en.htm> (verified 14 Jul. 2008).

USDA-SMSS. 1994. Keys to soil taxonomy. Washington: Department of Agriculture. Soil Management Support Services. 442p (Tech monograph, 19).

WANG, J.Y. 1960. A critique of the heat unit approach to plant response studies. *Ecology*, Durham, 41:785-790.

WATSON, D.J. 1947. Comparative physiological studies on the growth of field crops I. Variation in net assimilation rate and leaf area. *Annals of Botany*, 11: 41-76.

WEBBER, D.J. (ed) 1990. Biotechnology: assessing social impacts and policy implications. Greenwood Press, Westport, CT.

WILKERSON, G.G., JONES, J.W., BOOTE, K.J., INGRAM, K.T., MISHOE, J.W. 1983. Modeling soybean growth for crop management. *ASAE*, 26: 63-73.

WILSON, D.R. 1987. New approaches to understanding the growth and yield of pea crops. In 'Peas: Management for quality'. (Ed. W.A. Jermyn and G.S Wratt). *Agronomy Society of New Zealand Special Publication No. 6*, p. 23-28.

WILLIAMS, G.D.V. 1974. Deriving a biophotothermal time scale for barley. *Internacional. Journal of Biometeorology*, 18: 57-69.

WILLMOTT, C.J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63: 1309-1313.

WIT, C.T. de. 1965. Photosynthesis of leaf canopies. *Verslagen van landbouw kundige Onderzoekingen (Agricultural Research Report) 663*. Pudoc, Wageningen.

WIT, C.T. de, BROUWER, R., VRIES, F.W.T.P. de. 1970. The simulation of photosynthetic systems. En: SETLIK, I. (Ed.). *Prediction and measurement of photosynthetic productivity*. Wageningen : PUDOC. p. 47-70.